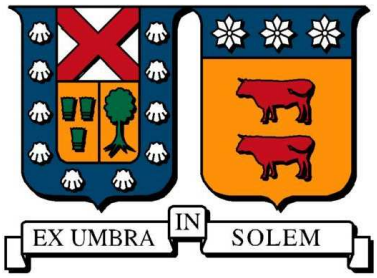
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO - CHILE



Diseño conceptual de un densímetro nuclear utilizando dos receptores para medir coincidencias en un ducto de concentrado de cobre

Matías Patricio Liz Vargas

TRABAJO DE TITULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: Dr. Ing. Franco Perazzo M.

PROFESOR CORREFERENTE: Dr. Ing. Sheila Lascano F.

Diciembre - 2017

A mis padres

por enseñarme lo que es la perseverancia

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Rene Rios por confiar en mi dándome la oportunidad de trabajar con él en este fantástico proyecto, al profesor Sergey Kuleshov por permitirme trabajar en la memoria de este Proyecto VIU 130075 y Franco Perazzo, mi profesor guía, que ha sido muy paciente conmigo brindándome consejo y apoyo para terminar esta memoria. No quiero olvidar a la profesora Sheyla Lazcano, que también me ha brindado consejo y apoyo en esta memoria.

También quiero agradecer a CCTVAL por proveer de la infraestructura y su agradable equipo de trabajo que siempre estuvo disponible para ayudarme y brindarme inspiración para continuar con esta memoria.

Finalmente agradezco a mi familia que me ha enseñado lo que es la perseverancia y la humilde voluntad de aferrarse al sueño de tener una carrera profesional. A mi madre Solange por tener infinita paciencia conmigo y brindarme su sonrisa. A mi padre José por ser el apoyo incondicional de mis talentos y permitirme soñar como un artista.

Resumen

La física nuclear trajo el descubrimiento de los radioisótopos y las radiaciones ionizantes. Este suceso abrió numerosas puertas a estudios prácticos sobre fenómenos que sobrepasaban el conocimiento humano. También trajo nuevos riesgos, imprudencias y malos usos de una tecnología que puede estudiar lo más pequeño, como el efecto fotoeléctrico, o destruir lo más grande, como una bomba de fisión nuclear.

En la aproximación de lo más pequeño, la ciencia ha conseguido importantes hallazgos y estudios, como por ejemplo "**El estudio de la mecánica cuántica por Albert Einstein**" y el fenómeno de la "**Emisión secundaria**", que finalmente representaron los principales ingredientes para la creación del primer "**Tubo Fotomultiplicador**", tecnología que a fines de los de los $30'$ se convirtió en un estándar del decaimiento de una partícula.

La creación del **Tubo Fotomultiplicador (Photomultiplier tube o PMT)** trajo grandes hallazgos como los ojos electrónicos que miden interrupciones o eventos en un haz de luz. En conjunto con un "**Cristal Centelleador**" trajo maravillas de avances en la medicina, la industria y la minería.

En el enfoque de la minería, el concentrado de los minerales de diversos metales es calculado considerando una serie de variables que no siempre se encuentran a disposición de quienes tienen interés en conocer en profundidad el valor real de este producto natural. Estos productos constituyen una mezcla de metales valiosos y que reciben el nombre del metal que se encuentra en mayor proporción, así por ejemplo, un "**Concentrado de Cobre**" puede contener entre 30 % a 50 % de cobre y el resto de metales valiosos pueden estar presentes en porcentajes mucho menores, pero son más valiosos que el cobre mismo.

La necesidad de saber la exacta concentración de estos subproductos del concentrado de cobre y el cobre mismo, necesita un estudio mineralogía a profundidad que puede tardar días y a un gran costo para la empresa minera. En este trabajo se presentará una solución a esta necesidad, que trata de una maquina capaz de entregar, rápida y eficazmente, mediciones de densidad en un concentrado de cobre.

Abstract

Nuclear physics brought us the discovery of radioisotopes and ionizing radiations. This event opened many doors to practical studies on phenomena that surpass our knowledge. It also brought new risks, recklessness and bad uses of a technology that can study the smallest, the photoelectric effect, or destroy the largest, such as a nuclear fission bomb.

Talking about the smallest, science has achieved important findings and studies, such as "**The study of quantum mechanics by Albert Einstein**" and "**The phenomenon of secondary**", which finally represented the main ingredients for the creation of the first "**Photomultiplier tube**", technology that by the end of $30'$ will become a standard in decay of a particle. The creation of **the Photomultiplier tube (PMT)** brought large findings such as electronic eyes that measure interruptions or events in a beam of light. In conjunction with a "**Crystal Scintillator**" it brought wonders of advances in medicine, industry and mining.

In the mining approach, the concentrate of the minerals of various metals is calculated considering a series of variables that are not always available to those who are interested in knowing in depth the real value of this natural product. These products constitute a mixture of valuable metals and are named after the metal which is found to be in the highest proportion, for example, a **copper concentrate** may contain between 30% to 50% Copper and other valuable metals may be present in much lower percentages, but are more valuable than copper itself.

The need to know the exact concentration of these by-products of the copper concentrate and copper itself requires a thorough mineralogy study that can take days and at a great cost to the mining company. This paper will introduce a solution about this need, which deals with a machine capable of rapidly and efficiently delivering density measurements in a copper concentrate.

Keywords: nuclear densitometer, cooper concentrate, density measurements.

Índice general

1 Introducción **1**

2 Objetivos **2**

3 Marco Teórico **3**

3.1 Identificación del problema del diseño 3

3.2 Análisis de soluciones existentes 4

3.3 Descripción del proceso del diseño 5

3.4 Definición del problema 6

4 Estado del arte **8**

4.1 ¿Qué es un detector gamma? 8

4.1.1 Como funciona un densímetro común 9

4.1.2 Como funciona un densímetro con etiquetador 10

4.1.3 Como funciona el densímetro doble 11

4.2 Investigación especializada a la ciencia del densímetro 14

4.2.1 ¿Qué es un evento? 14

4.2.2 Dispersión de la radiación Gamma 15

4.2.3 Medición de la densidad 18

4.2.4 ¿Qué es la atenuación? 19

4.2.5 Frecuencia de eventos 20

4.2.6 Dosimetría radiactiva y sus riesgos a la salud 23

4.2.7 Modelo de control de flujo de Radiación (Ángulo Sólido) 24

4.3 Patentes de invención 28

5 Etapas del Diseño Conceptual **30**

5.1 Listado de atributos 30

5.2 Objetivos, restricciones y funciones 31

5.3 Categorización de objetivos 32

5.4 Jerarquización de objetivos 33

5.5 Listas de objetivos argumentada 34

5.6 Lista de objetivos con pesos ponderados 35

5.7 Análisis funcional 36

5.7.1 Modelo de caja negra densímetro doble 36

5.7.2 Modelo de caja transparente densímetro doble 37

5.8 Análisis de competidores 38

5.8.1 Principales competidores o sustitutos 38

5.8.2 Benchmarking por objetivos 39

5.9 Lista de requerimientos 42

5.10 Matriz requerimientos-objetivos 43

5.11 Despliegue de la función de casa de la calidad(QFD) 44

5.12 Resolución de contradicciones de los requerimientos 46

5.13 Recopilación de datos 47

5.13.1 Análisis de patentes por función 47

5.13.2 Benchmarking por función 48

5.13.3 Brainstorming 49

5.13.4 Carta Morfológica 50

5.13.5 Generación de conceptos 51

5.13.6 Selección de concepto 54

6 Diseño Básico **55**

6.1 Estudio de densímetro Systec Modelo SS200 56

6.1.1 Estudio de medidas de densímetro Systec 58

6.1.2 Tipo de abrazadera y alineación 59

6.2 Arquitectura de Densímetro con Etiquetador 60
6.2.1 Arquitectura de cuerpo o abrazaderas 61
6.2.2 Arquitectura de etiquetador 62
6.2.3 Arquitectura de detector gamma 63
6.3 Definición de componentes 64
6.3.1 Isótopo o Fuente Radioactiva 64
6.3.2 Cristal Centelleador 66
6.3.3 Tubo Fotomultiplicador 67
6.3.4 Mu-Metal 69
6.3.5 Colimador 70

7 Diseño Detallado: Diseño mecánico conceptual Densímetro con Etiquetador 71
7.1 Ángulos sólidos del densímetro con etiquetador 72
7.2 Modelo de atenuación de plomo 78
7.3 Estudio soldadura en etiquetador 81
7.3.1 Ubicación de la soldadura 82
7.3.2 Datos importantes al diseñar soldadura 82
7.3.3 Método convencional para metal de aporte(Calculo resistencia Soldadura) 85
7.3.4 Calculo de altura de cordón para metal de aporte 86
7.4 Estudio de abrazaderas del etiquetador 87
7.4.1 Análisis estático de fuerzas 88
7.5 Análisis Ansys 92
7.5.1 Análisis de espárrago M10, ASTM A320 94
7.5.2 Primer análisis Ansys, usando fuerzas 276[N] 95
7.5.3 Segundo análisis Ansys, usando fuerzas de 829[N] 98
7.6 Análisis de resultados en Ansys 101
7.7 Nuevo diseño de abrazaderas 104
7.7.1 Nuevo diseño de abrazaderas con placa corregida 105
7.7.2 Tercer análisis Ansys, usando fuerzas de 829[N], sobre placa sostenedora re-diseñada . . 106
7.8 Diseño de Litodensitometro 109

8 Conclusiones **112**

A Norma ISO 2919:2012 **114**

B Análisis QFD **115**

C Norma Atex - Protección de explosiones **117**

D Los requerimientos ATEX **118**

D.1 ¿Cómo se relaciona el Litodensitometro con la norma ATEX? 119

E Protección IP 65 **120**

F Composición del flujo de concentrado de cobre **121**

G SS200 **123**

Índice de Tablas

4.1 Tabla de patentes relacionadas con las partes del densímetro 28

5.1 Jerarquización de objetivos 33
5.2 Listas de objetivos argumentada 34
5.3 Lista de objetivos con pesos ponderados 35
5.4 Principales competidores o sustitutos 39
5.5 Benchmarking de equipos comerciales similares 41
5.6 Lista de requerimientos 42
5.7 Matriz requerimientos-objetivos 43
5.8 Principales competidores o sustitutos 46
5.9 Análisis de patentes por función 47
5.10 Análisis de competidores por función 48
5.11 Principales competidores o sustitutos 50
5.12 Resultados pesos ponderados de Conceptos 54

6.1 Parámetros mecánicos densímetro Systec 56
6.2 Medidas generales densímetro Systec 58
6.3 Distintos tipos de uso industrial para radioisótopos 65
6.4 Ejemplos de cristales centelleadores y sus eficiencias a $662[keV]$ 67
6.5 Ejemplos de colimadores utilizados en densímetros nucleares 70

7.1 Valores de diseño para electrodo de soldadura en aceros austeniticos 83
7.2 Valores de diseño para electrodo de soldadura en aceros austenisticos [8] 84

7.3 Valores de diseño para estructuras de acero inoxidable [7] 84
7.4 Resultados de primer análisis de esfuerzos Von Mises, espárragos M10, carga 4,77$[Mpa]$. 95
7.5 Resultados de primer análisis de esfuerzos normales, espárragos M10, carga 4,77$[Mpa]$. 96
7.6 Resultados de primer análisis de deformación plástica espárragos M10, carga 4,77$[Mpa]$. 97
7.7 Resultados de segundo análisis esfuerzos Von Mises, espárragos M10, carga $14,3[Mpa]$. 98
7.8 Resultados de segundo análisis esfuerzos normales, espárragos M10, carga 14,3$[Mpa]$. 99
7.9 Resultados de segundo análisis de deformación plástica espárragos M10, carga $14,3[Mpa]$. . . . 100
7.10 Resultados de tercer análisis de esfuerzos Von Mises, espárragos M10, carga 14,3$[Mpa]$. 106
7.11 Resultados de tercer análisis esfuerzos normales, espárragos M10, carga 14,3$[Mpa]$. 107
7.12 Resultados de tercer análisis de deformación plástica espárragos M10, carga $14,3[Mpa]$. 108

F.1 Tabla de composición de concentrado de cobre 122

Índice de figuras

3.1 Tabla de diferentes tipos de medidores de densidad [5] 4
3.2 Ruta del diseño ingenieril [1] 5
3.3 Concentrado de cobre obtenido en columnas de flotación. 6

4.1 Esquema densímetro común 9
4.2 Esquema de densímetro con etiquetador 10
4.3 Sección cruzada, donde predomina efecto fotoelectrico para leer el número atómico. 11
4.4 Esquema de densímetro doble. 12
4.5 Espectro gamma suavizado que diferencia distintos materiales. 13
4.6 Interacciones de la radiación 14
4.7 Sección eficaz total por cada átomo individual, grafica adaptada de [3]. 15
4.8 Atenuación gamma [14] 19
4.9 Coeficiente atenuación total en plomo, imagen adaptada de [2]. 20
4.10 Esquema de desintegración del Sodio-22, créditos de imagen Wikipedia. 21
4.11 Esquema de desintegración del Cobalto-60, créditos de imagen Wikipedia. 22
4.12 Ángulo α en un circulo. [10] 24
4.13 Ángulo sólido Ω en una esfera. [10] 24
4.14 Casquete esférico (a) y cálculo de ángulo sólido (b). [10] 25
4.15 Disco de radio “b” (a) y cálculo de ángulo sólido “Ω” subtendido por el disco (b). [10] 26

5.1 Modelo de caja negra 37
5.2 Modelo de caja transparente 38
5.3 Fotos Densímetros para Benchmarking 40

5.4 Modelo de casa de calidad(**Anexo B**) . . . 44
5.5 Brainstorming de funciones . . . 49
5.6 Diseño concepto 1 . . . 51
5.7 Diseño concepto 2 . . . 52
5.8 Diseño concepto 3 . . . 53

6.1 Foto densímetro Systec. . . . 56
6.2 Balanza calibradora Systec. . . . 57
6.3 Foto densímetro Systec. . . . 58
6.4 Abrazadera densímetro ABLE. . . . 59
6.5 Tipos de alineación en montaje de abrazaderas. . . . 59
6.6 Vista explosionada general de Densímetro con Etiquetador. . . . 60
6.7 Vista real de abrazaderas. . . . 61
6.8 Vista explosionada Cuerpo central o Abrazaderas. . . . 61
6.9 Vistas diseño de etiquetador. . . . 62
6.10 Vista explosionada de etiquetador. . . . 62
6.11 Vistas diseño de detector gamma. . . . 63
6.12 Vista explosionada de detector gamma. . . . 63
6.13 Vista en detalle de una fuente radiactiva. . . . 65
6.14 Vistas de Cristal Centelleador . . . 66
6.15 Vistas de Tubo Fotomultiplicador . . . 68
6.16 Mu-Metal enrollado para envolver al PMT. . . . 69
6.17 Colimador con apertura de 2*mm*. . . . 70

7.1 Ángulo sólido proyectado desde la fuente. . . . 72
7.2 Vista en corte de Colimador contenedor de fuente radiactiva. . . . 73
7.3 Máximos ángulos colimador etiquetador. . . . 73
7.4 Exposición gamma a través de cristal centelleador derecho. . . . 74
7.5 Un pulso cada 50 nano segundos. . . . 74
7.6 Gráfico para seleccionar largo de cristal centelleador LaBr3(Ce). [12] . . . 75
7.7 Exposición gamma a través de cristal centelleador izquierdo. . . . 76

7.8 Gráfico para seleccionar largo de cristal centelleador Nal(Tl). [13] . . . 77
7.9 Gráfico de coeficiente de atenuación de plomo, imagen adaptada de [2]. . . . 78
7.10 Despiece de plancha soportante. . . . 81
7.11 Colimadores de etiquetador. . . . 81
7.12 Ensamble de plancha soportante de Etiquetador. . . . 82
7.13 Vista de detalle de etiquetador . . . 83
7.14 Vista de vector fuerza peso aplicada, y su centro de masa. . . . 83
7.15 Vistas completas de densímetro con etiquetador. . . . 87
7.16 DCL densímetro con etiquetador. . . . 88
7.17 Tabla de áreas de esfuerzo y diámetro, adaptado de libro Shigley. [4] . . . 90
7.18 Modelo básico. . . . 92
7.19 Caracterización acero 316L dentro de Ansys. . . . 92
7.20 Definición de esfuerzos en Ansys. . . . 93
7.21 Descripción gráfica de Área de esfuerzo de tensión. . . . 93
7.22 Demostración de parámetros para simulación. . . . 94
7.23 Primer análisis esfuerzos Von Mises con 4,77[Mpa]. . . . 95
7.24 Primer análisis de esfuerzos normales con 4,77[Mpa]. . . . 96
7.25 Primer análisis de deformación estructural con 4,77[Mpa]. . . . 97
7.26 Segundo análisis de Von Mises con 14,3[Mpa]. . . . 98
7.27 Segundo análisis de esfuerzos normales con 14,3[Mpa]. . . . 99
7.28 Segundo análisis de deformación estructural con 14,3[Mpa]. . . . 100
7.29 Demostración de distribución de esfuerzos sobre tubo minero. . . . 101
7.30 Vista superior de tubo minero, exagerando su deformación. . . . 101
7.31 Ejemplo de creación de base de datos sobre malla. . . . 102
7.32 Base datos para esfuerzos normales sección detector gamma. . . . 102
7.33 Base datos para esfuerzos normales sección etiquetador. . . . 103
7.34 Vistas placa sostenedora común. . . . 104
7.35 Vistas placa sostenedora corregida. . . . 105
7.36 Tercer análisis de Von Mises con 14,3[Mpa]. . . . 106
7.37 Tercer análisis de esfuerzos normales con 14,3[Mpa]. . . . 107

7.38 Tercer análisis de deformación estructural con 14,3[Mpa]. 108
7.39 Isometrica de viejo diseño Litodensitometro. 109
7.40 Isométrica de viejo diseño Etiquetador. 109
7.41 Vista de interfaz de montaje lateral. 110
7.42 Instalación de interfaces. 110
7.43 Vista isometrica de montaje plancha lateral. 111
7.44 Vistas laterales de montaje de fuentes y su detector. 111

B.1 Tabla de Casa de Calidad 116

D.1 Electronica de un densímetro. 119

E.1 Tubo que necesita proteger electrónica. 120

G.1 SS200 124

Nomenclatura

Mayúsculas

I	—	Segundo Momento de Área $[m^4]$.
I_u	—	Segundo Momento Unitario de Área $[m^3]$.
S	—	Momento resistente $[m^3]$.
N_a	—	Numero de Avogadro $[mol]^{-1}$.
I	—	Intensidad radiación medida $[fotonesporunidaddetiempo]$.
A_t	—	Actividad de radioisótopo $[Bq]$ o $[Ci]$.

Letras griegas

Γ	—	Constante especifica de isotopo, a un metro de distancia $\left[\frac{mSv/h}{MBq}\right]$.
σ	—	Energía de los fotones $[eV]$.
ρ	—	Densidad $[\frac{kg}{m^3}]$.
μ	—	Coeficiente de atenuación o absorción lineal $[-]$.
ϕ	—	Flujo de partículas $[fotonesporunidaddetiempo]$.
ω	—	Ángulo sólido $[Srad]$.
τ	—	Esfuerzo cortante $[pa]$.
σ	—	Esfuerzo normal $[pa]$.

Capítulo 1

Introducción

La minería Chilena siempre ha sido la precursora principal de la verdadera ingeniería del país, donde se pueden ver las reales aplicaciones de los conocimientos, de la ingeniería Chilena, plasmados en nuevas e innovadoras soluciones de trabajo. Una de estas soluciones es la aplicación de técnicas de la física de alta energía, que permiten medir la densidad de flujos de material mediante la atenuación de un flujo de radiación gamma. esta tecnología es aplicada en maquinas especializadas como un **Densímetro Nuclear**.

En la búsqueda de introducir al mercado un equipo medidor de densidad que pueda competir en el mercado nacional debido a la falta de oferta de otras soluciones comerciales. Primero se creará un diseño conceptual común que compita con los estándares de la minería Chilena y posteriormente se planteará un diseño conceptual que presente una mejora sustancial en la técnica de medición de densidad.

Capítulo 2

Objetivos

- Comprender la composición de un densímetro nuclear y su funcionamiento. Análisis del estado del arte de estos equipos. Capacitarse en el trabajo con elementos radioactivos como isótopos de sodio, cesio, etc...
- Definir las principales características del diseño conceptual, de acuerdo a especificaciones, normas (ATEX y IP66/67) y condiciones ambientales. Definir el problema de diseño en términos de objetivos, restricciones y funciones.
- Desarrollar la estructura funcional y establecer los requerimientos de ingeniería usando la metodología QFD. Generar conceptos basados en búsquedas internas y externas.
- Seleccionar un concepto y desarrollar la arquitectura del equipo.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1 Identificación del problema del diseño

Actualmente existe una situación desfavorable en la explotación de los recursos nacionales, ya que algunas empresas solo producen **Concentrado de Cobre** para reducir los costos de producción de commodities. En este concentrado existen metales preciosos que pueden ser utilizados para generar oportunidades productivas en otros tipos de procesos o mercados que pueden expandir el mercado Chileno. Lo que genera una incertidumbre en cuanto a perdida de oportunidades para expandir el mercado nacional.

Una forma de solucionar esta incertidumbre es analizando la composición del concentrado(o pulpa) utilizando una instrumentación especializada. Comúnmente la instrumentación utilizada en minería para medir densidad de pulpa son: medidores de flujo másico/densidad por efecto de coriolis, medidores ultrasónicos de densidad y finalmente medidores de transmisión por radiación.

Un densímetro nuclear puede medir la densidad del flujo de concentrado de cobre, utilizando atenuación por radiación. La principal ventaja de este equipo radica en que la medición es externa a la tubería, por lo que no se ve afectada por variables internas del flujo como: presión, corrosión, caudal, humedad, etc. También puede efectuarse en un breve lapso de tiempo, sin tener que apartar una muestra de la pulpa o concentrado como en el caso de un testigo.

Una de las grandes desventajas de los medidores de radiación es la calibración del equipo, ya que pueden existir errores de medición causados por estratificación del flujo, aire atrapado en la tubería y material depositado en las paredes de esta. Ademas la respuesta de los detectores de radiación se ve afectada por la temperatura y no se debe olvidar lo nocivas que pueden ser las radiaciones ionizantes para el ser humano.

3.2 Análisis de soluciones existentes

En la siguiente **figura 3.1** se puede observar una tabla tomada del libro [5] que muestra varios tipos de sensores de densidad, que sirve para seleccionar específicamente que tipo de instrumental es necesario para el tipo de flujo liquido utilizado. En este caso, el **medidor por atenuación de de radiación** funciona muy bien para la industria minera que utiliza servicios de lodos, a temperaturas, baja humedad y presión que pueden ser muy altas. Es también la razón de porque los medidores de densidad tanto de **Coriolis** como **Ultrasónicos** quedan descartados.

Tabla de orientación para selección de sensores de densidad

Diseño de sensores para LÍQUIDOS	*Aplicable a*			*Span mínimo basado en agua SG = 1.0*	*Incerteza en % del span o en unidades de SG*	*Limitaciones del diseño en presión y temperatura*		*Compensación de temperatura disponible*	*Indicador local directo*	*Transmisor*
	Procesos de flujos limpios	*Servicios de lodos*	*Flujos viscosos o de polímeros*			*PSIG/°F*	*Bars/°C*			
Tipo de posición angular	✓			0.1	0.5%	1000/500	69/260	N.S.		✓
Tipo de bola	✓			Digital	0.01 SG	600/160	41/71	N.S.	✓	✓
Tipo capacitivo	✓	✓	✓	0.1	1%	500/160	34.5/71	✓		✓
Tipo de desplazamiento Desplazamiento por fuerza de empuje	✓			0.005	1%	1500/850	130/472	N.S.		✓
Flotación balanceada por cadenas	✓			0.005	1–3%	500/450	34/232	✓	✓	✓
Suspensión electromagnética	✓			0.01	0.5–1%	200/350	14/177	✓		✓
Hidrómetros	✓			0.05	1%	100/200	7/93	✓	✓	✓
Tipo de cabeza hidrostática	✓	✓	✓	0.05	0.2–1%	5000/350	345/177	N.S.	✓	✓
Oscilador por efecto Coriolis	✓	✓	✓	0.1	0.02 SG o mejor	5000/800	345/426	✓		✓
Medición de atenuación de radiación	✓	✓	✓	0.05	1%	Ilimitado	Ilimitado	✓		✓
Sónico/Ultrasónico	✓	✓	✓	0.2	1–5%	1000/390	69/199	✓		✓
Tubo gemelo	✓	✓		Digital	0.0001	1440/356	100/180	✓	✓	✓
Densitómetro de diapasón	✓	L	L	0.02	0.001 SG	3000/392	207/200	✓		✓
Tipo de plato vibrante - piezoeléctrico (también para gas - ya no se fabrica)	✓	L	L	0.1	0.2%	1440/200	100/95			✓
Tipo bobina vibrante (también para gas)	✓	L	L	0.3	0.001 SG	725/300	50/149	✓		✓
Tipo de tubo vibrante en forma de U	✓			0.05	0.00005-0.005 SG	2900/500	200/260	✓		✓
Tipo de peso de volumen fijo	✓	✓	✓	0.05	1%	2400/500	165/260	✓	✓	✓

Figura 3.1: Tabla de diferentes tipos de medidores de densidad [5]

3.3 Descripción del proceso del diseño

Con la motivación de introducir un nuevo diseño de densímetro nuclear, se escogió la metodología ordenada por Morris Asimow que explica el proceso creativo de un diseño conceptual. Empezando por como presentar la definición del problema, obtener información, generar conceptos y evaluar estos últimos.

Morris Asimow estuvo entre las primeras personas en ofrecer una detallada descripción del completo proceso del diseño, el cual llamó "**La Morfología del Diseño**". Sus siete fases del diseño se describen a continuación en la **figura 3.2**. En ella se muestran varias actividades que componen las primeras tres fases del diseño: **Diseño Conceptual, Diseño de Realización(o Diseño Básico) y Diseño Detallado.** Para motivos de esta memoria, solo se utilizara la fase de diseño conceptual.

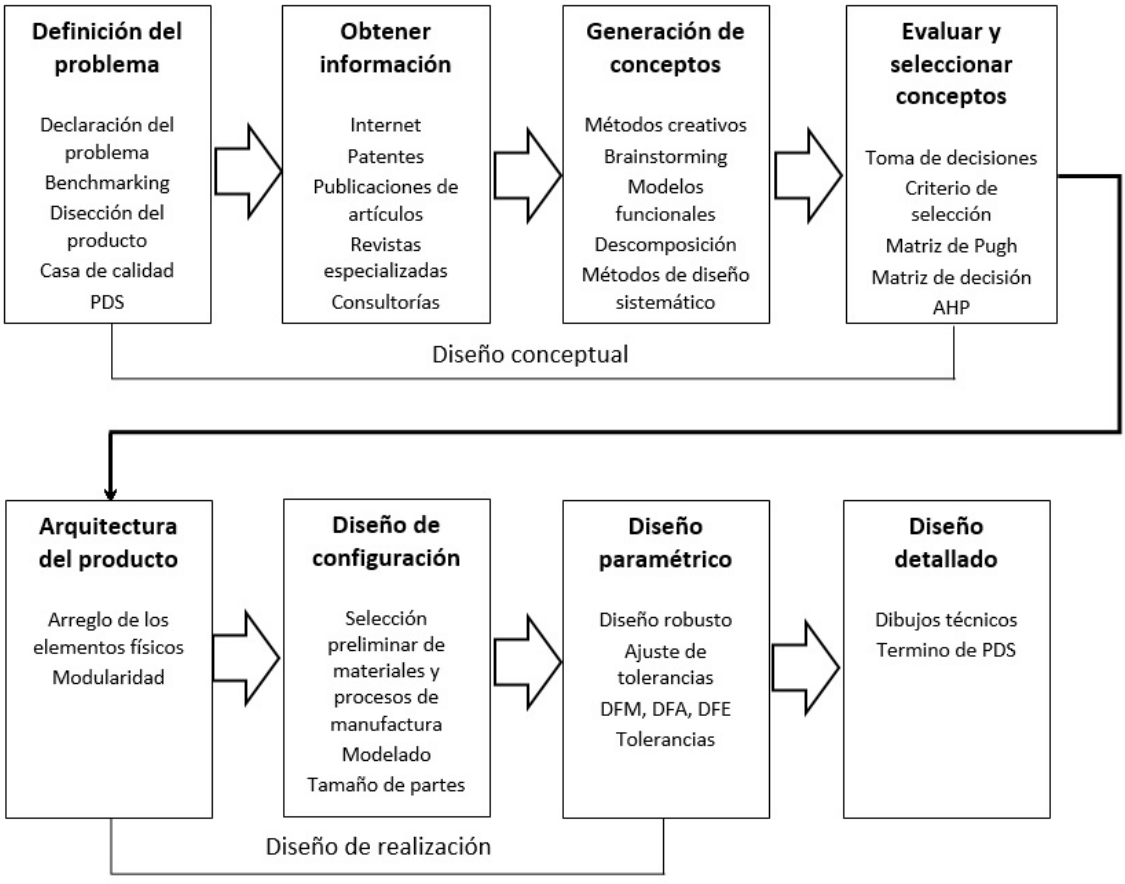


Figura 3.2: Ruta del diseño ingenieril [1]

El diseño conceptual es la fase inicial que conlleva a crear numerosas soluciones a problemas planteados, las que deben ser acotadas hasta encontrar el mejor concepto. Esto suele ser llamado "**Estudio de Factibilidad**", esta fase requiere una gran capacidad creativa, de gran incertidumbre, que requiere una gran coordinación sobre muchas funciones de la organización. Dicho esto, los puntos más importantes del diseño conceptual a considerar son:

- **Definición del problema**
- **Búsqueda de información (Estado del arte)**
- **Conceptualización**
- **Evaluar y seleccionar conceptos**
- **Revisión del diseño**

3.4 Definición del problema

Los concentrados de cobre (**figura 3.3**) provienen de las celdas de flotación que son el resultado de la trituración, chancado y molienda de los minerales sulfurados de minas subterráneas. Producto de la flotación de estos minerales pulverizados, se obtiene el concentrado y un residuo que constituyen los relaves. La composición química declarada de los concentrados se reduce generalmente a cuatro elementos: cobre, oro, plata y molibdeno. Después se informa el contenido porcentual de cobre en el **concentrado de cobre**, mas menos del orden del 30**-**40 %, y en [grs/ton] para oro y plata. En el momento que la minera consigue obtener la solución de concentrado de cobre, esta detiene el proceso de refinado. De esta forma la minera ahorra costos en procesos de refinación de cobre como: fundición, secado(**ánodos** $95-99\,\%$), conversión y finalmente la electro refinación que produce el **cátodo de cobre de** 99,995 % pureza.



Figura 3.3: Concentrado de cobre obtenido en columnas de flotación.

Una practica común de las mineras Chilenas es vender el concentrado de cobre en millones de toneladas/año y ahorrar en los gastos de refinación. Es por esto que es necesario encontrar un método que pueda medir el

porcentaje de cobre, en el flujo de concentrado, a una gran velocidad y sin interferir o detener el proceso de manufacturación de este. Una de las soluciones para saber la ley del cobre en un concentrado de cobre, es la utilización de densímetros medidores de atenuación de radiación. Estos miden externamente la densidad del flujo que pasa dentro de una tubería seleccionada, sin necesidad de extraer una muestra o un testigo.

Existe una gran cantidad de empresas extranjeras que fabrican densímetros nucleares, sin embargo las soluciones que estas presentan para la minería generalmente incluyen riesgos en utilizar fuentes de alta energía que pueden exponer al personal a altas dosis de radiación anual. Esto puede suceder por interactuar por largos periodos de tiempo con el densímetro, en el proceso de calibración de este.

En la **Universidad Federico Santa María**, existió una iniciativa de crear un prototipo funcional de un **Densímetro Nuclear con Etiquetador**, en un proyecto dirigido por el profesor **Sergey Kuleshov** y **René Rios**. Este diseño soluciona problemas como la calibración con agua, tiempo de lectura al momento de tomar mediciones y la exposición a la radiación que un densímetro nuclear comercial puede tener.

Utilizando la idea del densímetro con etiquetador, se explicará el diseño y funcionamiento de este. Este diseño también permitirá utilizar fuentes de menor energía, que disminuirán significativamente el peligro por exposición de radiación del personal. Por último se mostrará una propuesta de mejora tecnológica del densímetro nuclear, que consiste en expandir la capacidad de discriminar y medir, el tipo de material dentro del flujo de concentrado de cobre. El diseño de esta propuesta será llamado "**Litodensitometro**".

Capítulo 4

Estado del arte

El estado del arte está basado en una tecnología proveniente desde los $30'$ donde se consiguieron los primeros avances en tubos fotomultiplicadores y plásticos centelleadores. Los cuales generaron nuevos hallazgos en la ciencia de la radiación ionizante, y que posteriormente, a mediados de los $70'$, empezó a mostrar los primeros productos comerciales tales como densímetros. Si bien el modelo se basa en la identificación de un solo tipo de densidad, este nuevo diseño quiere ir un poco más allá en términos de eficiencia y precisión.

4.1 ¿Qué es un detector gamma?

El detector gamma está compuesto de un **Cristal Centelleador**, más un **Tubo Fotomultiplicador (PMT)**. La radiación gamma en forma de ondas electromagnéticas alcanzan los minerales enriquecidos del Cristal Centelleador, el cual brillará a causa de los cambios energéticos internos producidos por esta. Estos nuevos fotones, producidos en el cristal, serán captados por el Tubo Fotomultiplicador, que cumple la función de entregar estos datos al adquisidor de datos Caen, donde se podrá procesar la información y hacer los cálculos respectivos de densidad.

Un detector gamma que funciona con un PMT, en la actualidad es una tecnología un tanto desfasada que presenta un problema de interferencias debido a ondas electromagnéticas externas. Para esto se utilizan ”metales ferromagnéticos” capaces de detener estas ondas, las cuales poseen un indice de permeabilidad alto como por ejemplo el metal llamado “**Mu-metal**”, el cual posee un indice de permeabilidad del orden 80,000. Con este metal recubrimos el exterior del Cristal Centelleador y una porción del Fotomultiplicador para asegurar la efectividad de la medición.

4.1.1 Como funciona un densímetro común

Un densímetro común está compuesto de una fuente y un detector gamma, o también llamado receptor. En temas de seguridad la fuente siempre está cubierta de un protector o *"shielding"* que controla y técnicamente vectoríza la radiación de esta. En otras palabras evita que la radiación se extienda al exterior salvo la zona que se necesita, que será un tubo por donde fluirá el material a medir y finalmente llegará al detector gamma. Una representación del densímetro común puede ser vista en el siguiente dibujo (**figura 4.1**):

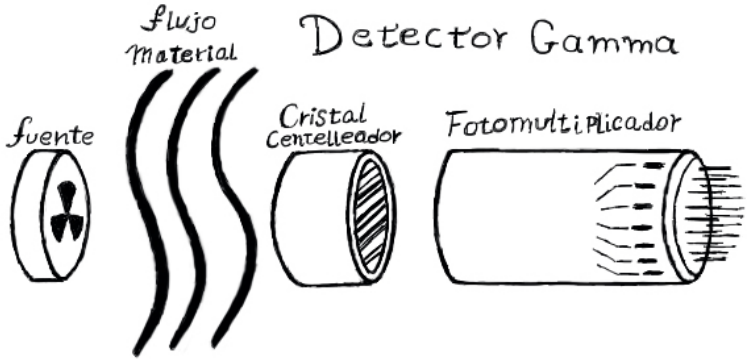


Figura 4.1: Esquema densímetro común

Después de instalar el densímetro en la tubería de concentrado el primer paso a realizar es la calibración utilizando agua como fluido a medir, sin embargo la instrumentación nuclear del densímetro común tradicional utiliza un solo sensor, no habiendo posibilidad de hacer un monitoreo directo de la actividad de la fuente. Esto hace necesario estimar el decaimiento de la fuente radiactiva. Por otro lado, la atenuación de la radiación se calcula en un tiempo de integración definido y en base a un valor estimado/calibrado de radiación incidente inicial de la fuente, donde solo habrá una referencia a la medición que con el paso del tiempo será estimativa.

Es por esto que es necesario re-calibrar el densímetro cada ciertos periodos de tiempo, ya que solo se tiene un conocimiento aproximado de la actividad real de la fuente.

Generalmente para estos densímetros es común utilizar una fuente de alta potencia, como por ejemplo un gramo de Cobalto-60 que posee una actividad de $1{,}85[TBq]$ y aproximadamente una dosis de $0{,}5[mSv * min]$ a un metro de distancia. Lo que se traduce que la exposición a esta es suficientemente nociva para la salud, y una prolongada exposición del personal a la radiación.

4.1.2 Como funciona un densímetro con etiquetador

La principal diferencia del diseño de un etiquetador (**figura 4.2**), es la adición de un segundo cristal centelleador y tubo fotomultiplicador, que se ubican justo detrás de la fuente radiactiva. De esta forma se realizará una lectura con solo aire y a muy poca distancia(sin interferencias ni flujos), de la actual intensidad(real) de la fuente. Lo que implicará tener la ventaja de poder calibrar al densímetro a distancia, las veces que sea necesario y sin exponer al personal a dosis de radiación.

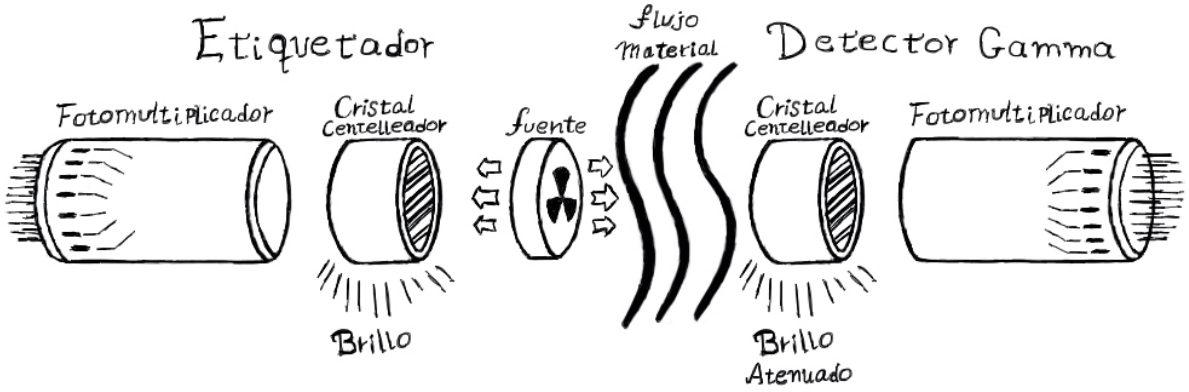


Figura 4.2: Esquema de densímetro con etiquetador

Con este método de medición es posible utilizar una fuente radiactiva de menor intensidad a la utilizada por los equipos tradicionales, lo que disminuye el riesgo de la exposición del personal a radiaciones nocivas.

Debido a que se puede tener una mayor precisión de la potencia actual de la fuente radiactiva al momento de hacer la comparación respecto a la lectura de atenuación del flujo de partículas. Se puede hacer una comparación simultanea de estas dos mediciones para obtener una medición de densidad mas precisa.

4.1.3 Como funciona el densímetro doble

La Litología es una parte de la geología que estudia la composición y estructura de las rocas, como su tamaño de grano, características físicas y químicas, estructuras sedimentarias, etc. También incluye su composición, su textura, composición mineralógica, distribución espacial y material cementante.

Se esta haciendo un estudio de una maquina capaz de medir la densidad de uno o mas elementos de un fluido compuesto, discriminando e identificando a cada uno de estos utilizando radiación gamma. Este avance podría conllevar a la unión entre la tecnología de un densímetro nuclear y la Litología. Este tipo de estudio es llamado **"Litodensidad(Lithodensity)"**.

Existe un modelo teórico llamado: "**La base física de la formación litológica con rayos gamma**(The physical foundation of formation lithology logging with gamma rays, W.Bertozzi, D.V.Ellis y J.S.Wahl)", que habla del proceso de propagación de fotones y el desarrollo de un espectro gamma. Debido a este estudio se encontró una solución precisa para el simple caso de un **Medio Infinito con Fuentes Uniformemente Distribuidas**(Infinite medium with uniformly distributed sources "**IMUDS**"). La aplicación de este modelo trata de entender la variación de densidad respecto a los cambios en la litología, y la naturaleza de la perturbación inducida por un detector en el espectro de equilibrio.

Según este modelo teórico se afirma que existe una forma de medir densidad, midiendo rayos gamma de baja energía. Estos muestran una región de energía donde el efecto fotoeléctrico y el Compton son comparables. Este descubrimiento es importante, debido a que se puede crear información litológica vía "**sección cruzada(cross-section)**" (**figura 4.3**), donde se puede identificar el número atómico específico de cada material en una sección eficaz que comprende de tanto al efecto Fotoeléctrico (IF) y efecto Compton (IC). El efecto Fotoeléctrico presenta una mejor efectividad al momento de medir elementos específicos en un entorno de baja energía, donde existen numerosos materiales que interfieren con la dispersión Compton.

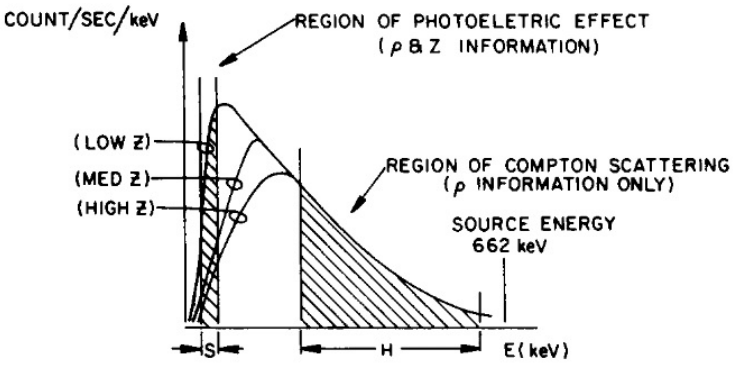


Figura 4.3: Sección cruzada, donde predomina efecto fotoelectrico para leer el número atómico.

Gracias a este avance es posible crear un espectro en una sección localizada y especificada por el método IMUDS, que podrá anticipar pequeños cambios en específicas geometrías por métodos analíticos, y con una razonable certeza.

Para generar esta sección localizada que utilizará este espectro con una angulación compton determinada, que será analizada bajo el modelo IMUDS. Se creará un densímetro doble que para motivos de esta memoria, será una extension del densímetro con etiquetador, sumando otra fuente y detector gamma similar al modelo del densímetro común de alta energía, por lo que se podría nombrar como un híbrido entre estos dos modelos. Primero contará con una fuente de alta intensidad radiactiva de Cobalto-60, y a 90° de este se cruza una fuente, de baja intensidad, de Sodio-22 con etiquetador (**figura 4.4**). De esta forma se podrá hacer el estudio IMUDS con dos isotopos radiactivos, en dos rangos de energía distintos que generarán la sección cruzada que se desea investigar.

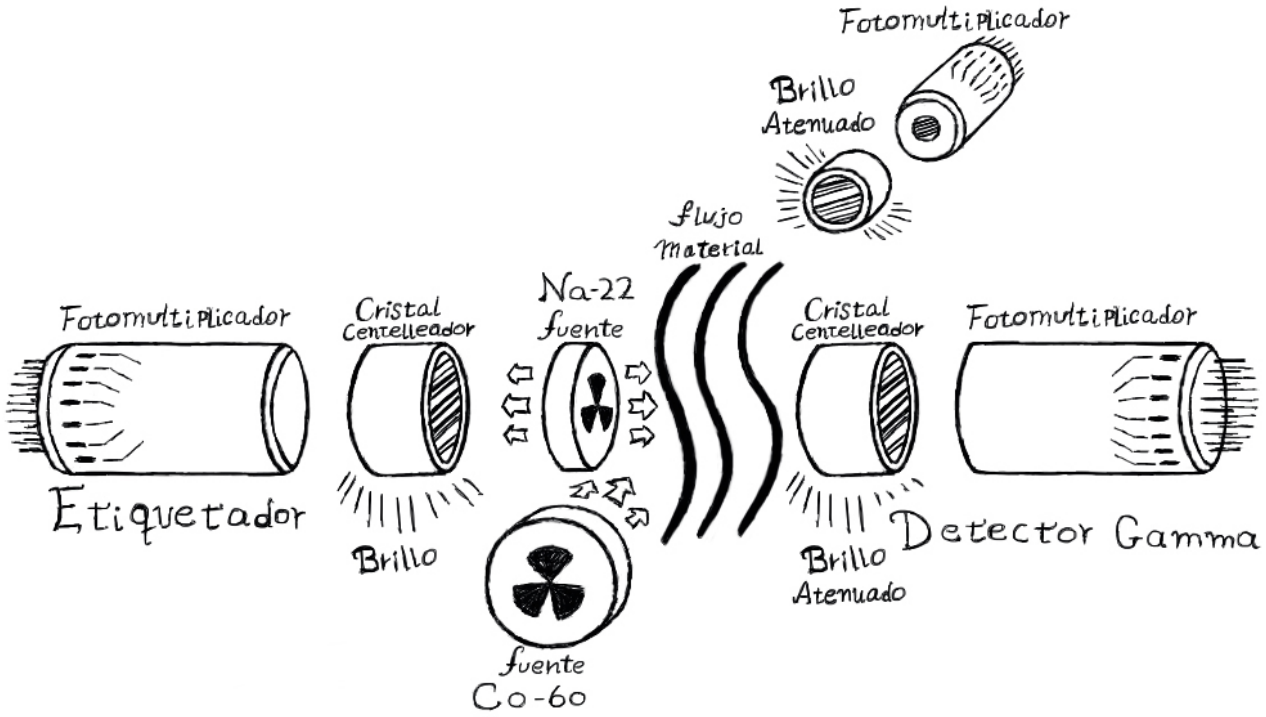


Figura 4.4: Esquema de densímetro doble.

El avance más ambicioso que presenta esta memoria, y objetivo a largo plazo, es construir un sistema que pueda identificar diversos componentes específicos en el concentrado de cobre. Como por ejemplo sería útil encontrar la ley del cobre buscando exactamente la concentración de este, o buscar concentraciones de metales preciosos como oro o plata dentro de la mezcla. Como ejemplo, la **figura 4.5** muestra un espectro gamma que puede diferenciar entre los diversos componentes que albergan una tubería industrial de $8[pulg]$ que fue llenada con agua no potable. El gráfico destaca la separación de los pesos atómicos en la sección cruzada, que es la curva antes del máximo encontrado en los $100[KeV]$. En un futuro cercano, esta máquina podrá hacer un análisis simultaneo de densidad y litológico del flujo, en una herramienta que podría llamarse **"Litodensitometro"**.

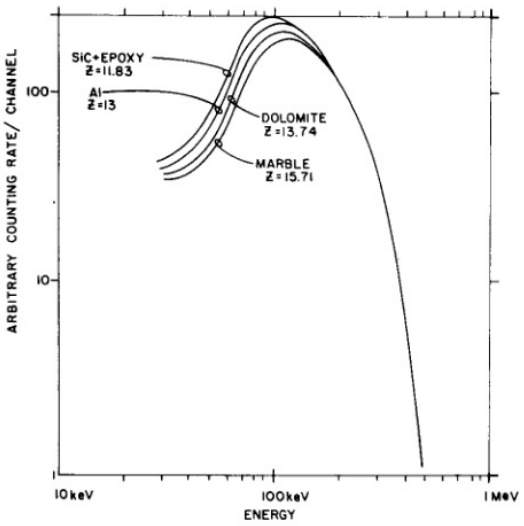


Figura 4.5: Espectro gamma suavizado que diferencia distintos materiales.

4.2 Investigación especializada a la ciencia del densímetro

En esta sección se explicará la ciencia detras del funcionamiento del densímetro que actualmente se usa en el mercado. Se explicará como se utiliza la excitación de un electrón para generar una lectura de evento que se expandirá a un flujo de radiación inicial. Conociendo la cantidad de eventos que este flujo de radiación inicial genera, posteriormente se explicará el fenómeno de "atenuación" de este flujo con paredes de densidad determinada. Finalmente se explicaran los riesgos de salud, al trabajar con elementos radiactivos, explicando la importancia del registro de la dosimetría anual.

4.2.1 ¿Qué es un evento?

Un evento es la producción de un fotón, en este caso en el cristal centellador. Esto se produce por la excitación de un electrón a un estado superior, producto de la absorción de la energía de los rayos gamma. Al volver de su estado superior a su estado de valencia, el electrón produce un fotón de luz.

Un fotón es una partícula portadora o transportadora de las fuerzas que se producen en las etapas intermedias de la excitación del electrón. También es portadora de todas las formas de radiación electromagnética, incluyendo: **Rayos Gamma, Rayos X, Luz Ultravioleta, Luz Visible (Espectro electromagnético), Luz Infrarroja, Microondas, Ondas de Radio.**

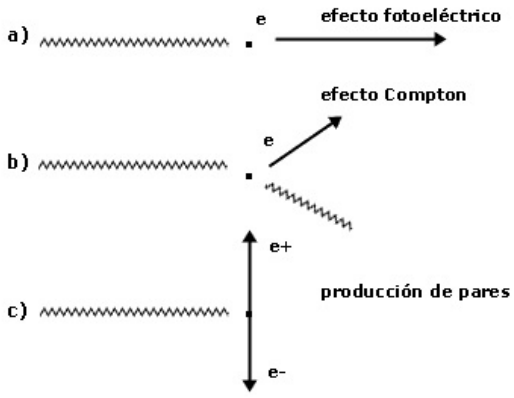


Figura 4.6: Interacciones de la radiación

De la producción de un fotón, y la absorción de su energía por parte de otro electrón que colisiona con este, se produce el "**Efecto Fotoeléctrico**" (IF) (**figura 4.6**), el cual es un proceso dominante para fotones de baja energía. El cambio de cantidad de movimiento, frecuencia y energía que el fotón sufre después de la colisión, es llamado "**Efecto Compton**" (IC). Por último cuando un fotón se acerca al campo eléctrico de un núcleo puede suceder la "**Producción de Pares**" (CP), donde el fotón se transforma en un par electrón-positrón.

4.2.2 Dispersión de la radiación Gamma

Para poder entender como se mide la densidad de un flujo con rayos gamma. Primero hay que entender que al bombardear un material con un haz gamma, se produce una dispersión de este haz gamma, producto de la interacción entre las partículas lanzadas hacia un "**Centro Dispersor**".

El objeto que genera la **interacción** de la partícula con el centro de dispersión es llamado "**Blanco**". Si este centro dispersor es controlado, se puede cuantificar la ocurrencia de esta interacción, por ejemplo se puede tener un centro dispersor que posea un solo "blanco" y este genere una sola interacción. Entonces, si aumento el volumen de la sección de dispersión para aumentar la cantidad de "blancos" y sus interacciones, podemos decir que la dispersión de radiación Gamma depende de la "**densidad de blancos por unidad de volumen**".

Es bien sabido que todo átomo de la materia posee **Z** electrones. Es posible mostrar la "**Sección Eficaz**" total por átomo individual del material, de la siguiente forma:

$$\sigma = \sigma(IF_{electrico}) + \sigma(IC_{compton}) + \sigma(CP_{pares}) \tag{4.1}$$

Cada sección eficaz ya sea **Efecto Fotoeléctrico (IF)**, **Efecto Compton (EC)**, o **Producción de Pares (CP)**, dependen de la cantidad de electrones presentes en el material. Es por esto que todas las secciones eficaces que producen fotones Gamma estarán de alguna forma relacionadas con el número atómico Z.

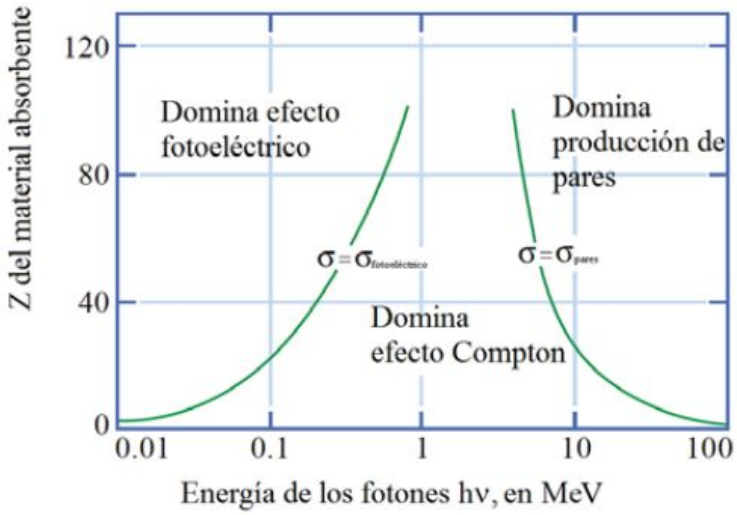


Figura 4.7: Sección eficaz total por cada átomo individual, grafica adaptada de [3].

En la **figura 4.7** se muestran los valores "Z" y la energía Gamma "$E = hv$", donde se aprecia en lineas verdes, las probabilidades de interacción de los dos efectos adyacentes.

El siguiente paso de este calculo es aumentar el volumen de dispersión para relacionar la "Sección Eficaz" con la "densidad de blancos por unidad de volumen". Esto se hace multiplicando la sección eficaz por la densidad de átomos por unidad de volumen:

$$N_{\frac{atom}{vol}}\sigma = N_{\frac{atom}{vol}}\sigma(IF_{electrico}) + N_{\frac{atom}{vol}}\sigma(IC_{compton}) + N_{\frac{atom}{vol}}\sigma(CP_{pares}) \tag{4.2}$$

Para calcular la "densidad de átomos por unidad de volumen" (n), tenemos que recordar que "A" es el número másico de los átomos que conforman el material y "M" es la masa de este material. Entonces multiplicando el número de moles por el número de Avogadro (N_a) tenemos que el número de átomos es:

$$N^o_{atomos} = N_a * n_{moles} = N_a\frac{M}{A} \tag{4.3}$$

Luego, para calcular la densidad de átomos por unidad de volumen (V):

$$\frac{N^o_{atomos}}{V} = N_a\frac{M}{AV} \tag{4.4}$$

Siendo "ρ" la cantidad de masa de un cuerpo por unidad de volumen:

$$\frac{N^o_{atomos}}{V} = N_a\frac{\rho}{A} \tag{4.5}$$

Posteriormente, combinando las **ecuaciones 4.2** y **4.5** se obtiene la probabilidad de interacción por unidad de longitud μ:

$$\mu = N_a\frac{\rho}{A}\sigma = N_a\frac{\rho}{A}\sigma(IF_{electrico}) + N_a\frac{\rho}{A}\sigma(IC_{compton}) + N_a\frac{\rho}{A}\sigma(CP_{pares}) \tag{4.6}$$

Esta ecuación es comúnmente conocida como "Coeficiente de absorción total", sin embargo, usualmente se busca trabajar en la zona donde el efecto Compton (IC) domine por sobre las otras interacciones, debido a que suele presentar resultados mejor definidos y amigables de abordar.

Por lo que la sección eficaz de importancia se verá reducida a la siguiente formula:

$$\sigma \approx \sigma(IC_{compton}) \tag{4.7}$$

$$\mu = N_a \frac{\rho}{A} \sigma \approx N_a \frac{\rho}{A} \sigma(IC_{compton}) \tag{4.8}$$

Existe una formula para representar el número total promedio de fotones dispersados en todos los ángulos posibles (N_{tot}), y el flujo incidente de partículas a la zona de dispersión (ϕ_o):

$$N_{tot} = \frac{\phi_o}{S} S N_{\frac{blancos}{vol}} dx\sigma \tag{4.9}$$

Siendo el número de blancos por unidad de volumen ($N_{\frac{blancos}{vol}}$) la cantidad de partículas que generan interacciones en una sección de dispersión determinada, S el área del material que interactuá con el haz y dx el espesor del material en la misma dirección del haz.

$$\phi = \phi_0 + d\phi \quad \Rightarrow \quad d\phi = \phi - \phi_0 \tag{4.10}$$

Donde ϕ es el flujo de partículas saliente y ϕ_0 es el flujo de partículas incidentes. Siendo $d\phi$ el diferencial del flujo de partículas, esta es igual al número de interacciones por unidad de tiempo N_{tot}, pero el orden es:

$$N_{tot} = \phi_0 - \phi \tag{4.11}$$

Debido a esto, existe un cambio de signo:

$$N_{tot} = -d\phi \tag{4.12}$$

Uniendo la **ecuación 4.9** con **4.12** se obtiene:

$$-d\phi = \frac{\phi_o}{S} S N_{\frac{blancos}{vol}} dx\sigma \tag{4.13}$$

Para aclarar la forma en que ϕ_0 se relaciona con $d\phi$ se debe hacer una suposición que define al espesor del material en la misma dirección de propagación del diferencial. Lo que tiene por consecuencia que la diferencia entre el flujo incidente y el saliente sea también diferencial, por lo que podemos asumir que $\phi \approx \phi_o$, quedando lo siguiente:

$$-d\phi = \frac{\phi}{S} S N_{\frac{blancos}{vol}} dx\sigma \tag{4.14}$$

Finalmente si se une el resultado de la **ecuación 4.8** con la **ecuación 4.14** se obtiene o siguiente:

$$-d\phi = \frac{\phi}{S} N_a \frac{Z}{A} \rho \sigma (IC_{compton}) S dx \;\; \Rightarrow \;\; -d\phi = \phi N_a \frac{Z}{A} \rho \sigma_{(IC)} S dx \tag{4.15}$$

Se procede a integrar esta ecuación diferencial, para generalizar el resultado como la suma del efecto de varias capas superpuestas del material de espesor infinitesimal:

$$\int_{\phi_0}^{\phi} \frac{d\phi}{\phi} = -N_a \frac{Z}{A} \rho \sigma_{(IC)} \int_0^x dx \;\; \Rightarrow \;\; \ln\phi - \ln\phi_0 = -N_a \frac{Z}{A} \rho \sigma (IC) x \tag{4.16}$$

Finalmente se obtiene:

$$\phi = \phi_0 e^{-N_a \frac{Z}{A} \rho \sigma_{(IC)} x} \tag{4.17}$$

4.2.3 Medición de la densidad

Para obtener la formula de medición de densidad se interpreta, desde la **ecuación 4.17**, el flujo saliente de partículas ϕ como "I", y al flujo incidente de partículas ϕ_0 como "I_0":

$$I = I_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \tag{4.18}$$

Donde $\mu = \frac{1}{\lambda}$ es denominada como el "Coeficiente de absorción" y equivale a la siguiente sección de la **ecuación 4.8**:

$$N_a \frac{Z}{A} \rho \sigma_{(IC)} = \frac{1}{\lambda} \;\; \Rightarrow \;\; I = I_0 e^{-\mu x} \tag{4.19}$$

La **ecuación 4.19** es importante para motivos de esta memoria, ya que con ella se pueden calcular espesores de pared de un material especifico que atenúen los rayos Gamma hasta un limite deseado. Especificamente hablando, hasta un limite donde estos no sean nocivos para la salud humana o estén bajo el marco que permite la ley local.

4.2.4 ¿Qué es la atenuación?

La atenuación (**figura 4.8**) es el producto del paso de los rayos gamma a través de una sustancia o fluido, la cual disminuye la intensidad del flujo de radiación en la formula dada por la **Ley de Beer-Lambert**, que es la misma mostrada en la **ecuación 4.18**:

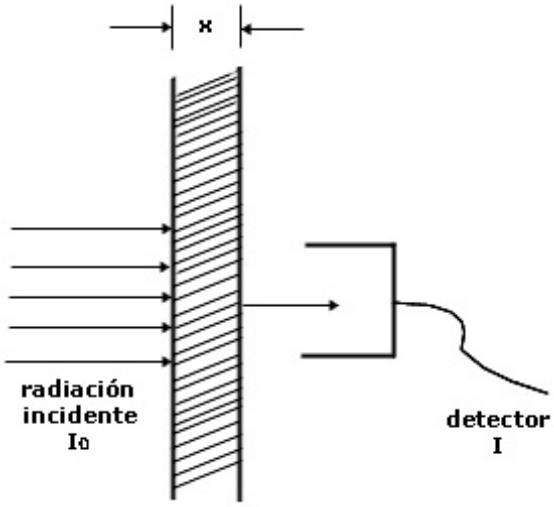


Figura 4.8: Atenuación gamma [14]

$$I = I_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad \wedge \quad N_a \frac{Z}{A} \rho \sigma_{IC} = \mu \tag{4.20}$$

Donde "I", es el número de radiación saliente, fotones por unidad de tiempo "I_0" es el flujo de radiación entrante, fotones por unidad de tiempo, "x" es el espesor lineal en la dirección que se realiza la medición del flujo a través del material y "$\mu = 1/\lambda$"(**ecuación 4.19**) es el coeficiente de atenuación lineal del material. Este último coeficiente depende de la composición del material y de la frecuencia o energía de los fotones incidentes.

Entonces utilizando los valores medidos de flujo incidente, saliente y la **ecuación 4.20** para relacionarlos entre si, se obtendrá el coeficiente de atenuación lineal del material ante radiación gamma:

$$I = I_o e^{-x/\lambda} \quad \Rightarrow \quad ln\left(\frac{I}{I_o}\right) = -\frac{x}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{ln\left(\frac{I}{I_o}\right)}{x} \quad \Rightarrow \quad \mu = \frac{ln\left(\frac{I}{I_o}\right)}{x} \tag{4.21}$$

Siendo que la **ecuación 4.21** obtenida es el comienzo de la demostración para identificar la constante de atenuación lineal de un material especifico. Esta se puede extrapolar para detectar mas de un coeficiente de atenuación, dentro de un compuesto, y por ende detectar mas materiales. Sin embargo, en la siguiente **figura 4.9**

se puede saber el coeficiente de atenuación, para un material previamente elegido como el plomo, a partir de la intersección del dato de la energía de la fuente radiactiva con la curva. Es por esto que no se profundizará mas en el tema del coeficiente de atenuación, ya que para motivos de esta memoria solo basta con saber que material de protección de pared se utilizará y cuanta es la energía de la fuente radiactiva.

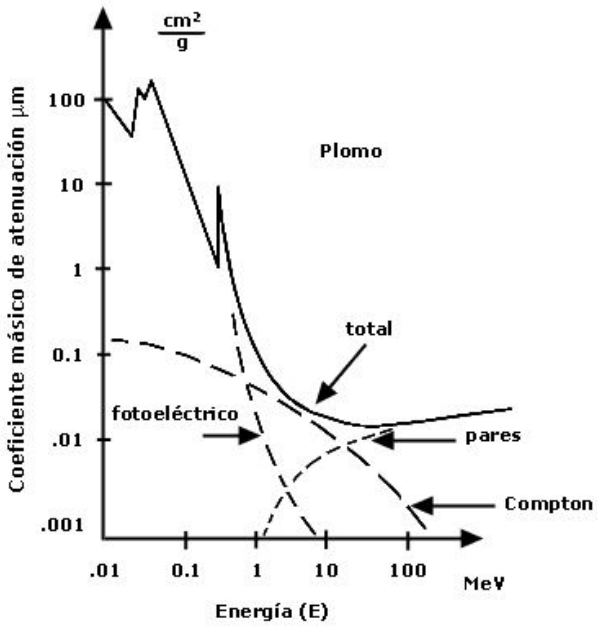


Figura 4.9: Coeficiente atenuación total en plomo, imagen adaptada de [2].

Saber cuanto se atenuará el haz gamma es importante para el diseño de la protección de pared del densímetro, ya que será esta la que disminuirá la dosimetría que expondrá la salud del personal ante un posible riesgo de salud.

4.2.5 Frecuencia de eventos

La frecuencia con que los radioisótopos crean eventos o emiten fotones en el cristal centelleador, guarda relación con el esquema de desintegración. Este esquema es específico para cada radioisótopo, así como la semivida de este. El esquema de desintegración es una representación de todas las transiciones que ocurren durante el decaimiento de un radioisótopo y sus interrelaciones.

La actividad de una muestra de radioisótopo se define como:

$$A_{(t)} = \lambda_{dec} N_0 e^{-\lambda_{dec} t} \tag{4.22}$$

Donde $A_{(t)}$ es la actividad o tasa de decaimiento en función del tiempo, con unidad de medida "*Becquerel*" $[Bq]$ o Curios $[Ci]$, que indica el número de decaimientos por segundo. Siendo N_0, la cantidad inicial de núcleos del radioisótopo presentes y finalmente $1/\lambda_{dec}$ es la constante de tiempo de decaimiento del radioisótopo. También es importante saber la equivalencia de la unidad Curios a Becquerel es la siguiente:

$$1[Ci] = 3,7x10^{10}[Bq] \tag{4.23}$$

Debe ser sabido que la semivida $T_{1/2}$, es el tiempo que transcurre para que la actividad del radioisótopo se reduzca a la mitad de la inicial, que se representa de la siguiente forma:

$$A_0 = \lambda_{dec} N_0 \;\; \Rightarrow \;\; A_{T_{1/2}} = \lambda_{dec} N_0/2 \tag{4.24}$$

De esta forma se puede relacionar la semivida con la constante de tiempo de la siguiente forma:

$$A_{T_{1/2}} = \lambda_{dec} N_0 e^{-\lambda_{dec} T_{1/2}} = \frac{\lambda_{dec} N_0}{2} \;\; \Rightarrow \;\; T_{1/2} = \frac{1}{\lambda_{dec}} ln(2) \tag{4.25}$$

Un ejemplo de lo anteriormente explicado se muestra en el esquema de desintegración de la fuente Sodio-22 (**figura 4.10**) que se utilizará en el diseño propuesto de esta memoria.

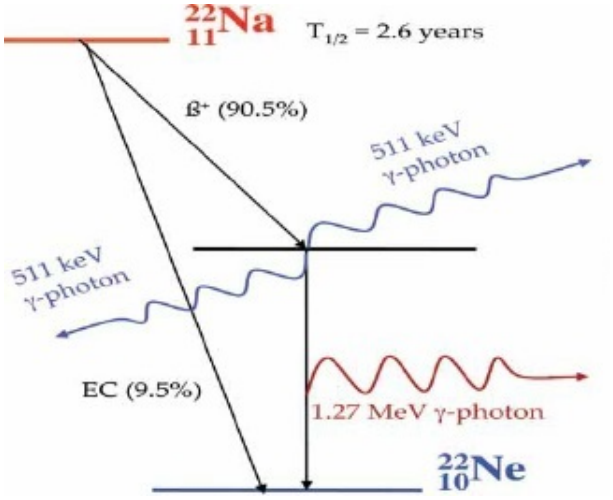


Figura 4.10: Esquema de desintegración del Sodio-22, créditos de imagen Wikipedia.

El **Na-22** tendrá un decaimiento beta-menos, que sucederá con una probabilidad de $90,5\,\%$, produciendo un fotón de $511[keV]$. Seguido de este evento emitirá un fotón de energía $1,27[MeV]$ para llegar a su estado de

energía mínima que lo transformara en Neon-22. El segundo caso tiene una probabilidad del $9,5\,\%$, que emite fotón de energía $511[KeV]$. Lo mas importante de este decaimiento es que el positrón liberado por el Sodio interactuá con los electrones del material, produciendo un par de rayos gamma de $511[KeV]$ de energía que viajan en direcciones opuestas. Por último es necesario mencionar que la vida media del **Na-22** es de $2,6$[años].

Otro ejemplo de desintegración para otra fuente que será utilizada en esta memoria, sera la del Cobalto-60 (**figura 4.11**).

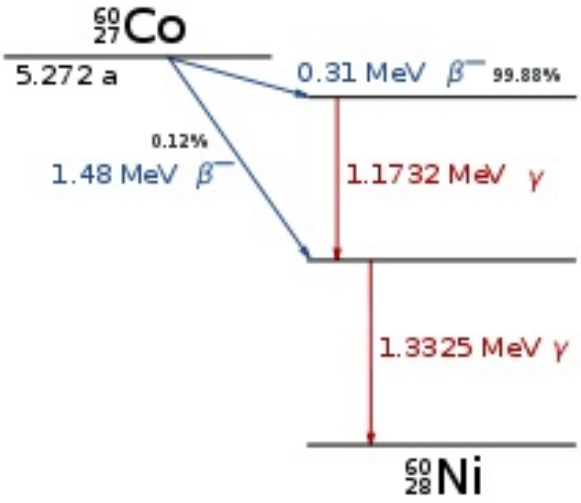


Figura 4.11: Esquema de desintegración del Cobalto-60, créditos de imagen Wikipedia.

Se puede apreciar que en el $99,88\,\%$ de los casos, el **Co-60** tendrá un decaimiento beta-menos, produciendo una energía cinética de $310[keV]$. Es por esto que el nuevo núcleo de Níquel-60 emitirá dos rayos gamma en cascada, el primero de $1,17[MeV]$ y el segundo de $1,33[MeV]$, con lo que conseguirá llegar a su estado de energía mínima. En otro caso del $0,12\,\%$, el Cobalto-60 decaerá directamente al estado intermedio, mediante un decaimiento beta-menos emitiendo $1,48[MeV]$ de energía cinética. Se destaca que la vida media del Cobalto-60 es de $5,27$ [años].

4.2.6 Dosimetría radiactiva y sus riesgos a la salud

El Sievert una unidad derivada del sistema internacional de unidades que mide dosis de radiación absorbida por la materia viva. La cual es muy similar a la unidad de medida de dosis absorbida, llamada Gray, pero el Sievert se basa en el daño biológico.

Síntomas en humanos por radiación acumulada durante un día:

- $0 - 0,25$ Sv: No hay daño.
- $0,25 - 1$ Sv: Nauseas y perdida de apetito. Posibles daños a médula ósea, ganglios linfáticos y el baso.
- $1 - 3$ Sv: Nauseas agudas, perdida de apetito, infección. Daños a médula ósea, ganglios linfáticos y el baso.
- $3 - 6$ Sv: Nausea severa, perdida de apetito, hemorragias, infección, diarrea, descamación, esterilidad, y muerte si no se trata.
- $6 - 10$ Sv: Mismos síntomas, más deterioro del sistema nervioso central. Muerte probable.
- Más de 10 Sv: Parálisis y muerte.

Síntomas en humanos por radiación acumulada durante un año:

- $2,5$ mSv: Radiación media anual global.
- $5,5 - 10,2$ mSv: Valores naturales medios en Brasil y en Irán. Sin efectos nocivos.
- $6,9$ mSv: Equivalente a escáner CT o TAC.
- 50 mSv: **Dosis anual permitida en Chile.**
- $50 - 250$ mSv: Limite para trabajadores de prevención y emergencia, respectivamente.

4.2.7 Modelo de control de flujo de Radiación (Ángulo Sólido)

La definición de ángulo para un circulo de dos dimensiones (**figura 4.12**) descrito entre L1 y L2, dice que cada ángulo plano mantiene la razón "α"(Radián), entre la división del arco "S_n" y el radio "R_n".

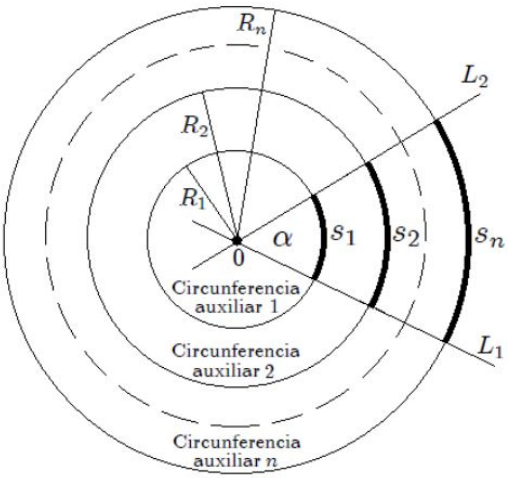


Figura 4.12: Ángulo α en un circulo. [10]

Otro caso muy similar es la definición del ángulo sólido para una esfera de tres dimensiones. El ángulo sólido de comporta de similar forma a la descrita anteriormente, donde se mantiene la razón "Ω"(Estereorradián) entre la división del área "S_n" y el radio "R_n".

El flujo de radiación es modelado idealmente como una esfera perfecta que se expande desde el centro del isótopo, tal como se muestra en la **figura 4.13**, un "**Ángulo Sólido**" en tres dimensiones. Lo que equivaldría a un circulo que se expande hasta tocar con algún objeto, al suceder esto(en términos básicos), se producirán dos tipos de interacciones: ser absorbido para desaparecer o generar un fotón. La importancia de este estudio será controlar el lugar donde colisiona el haz gamma para generar el fotón y los restantes deberán ser absorbidos por el plomo o la pared protectora.

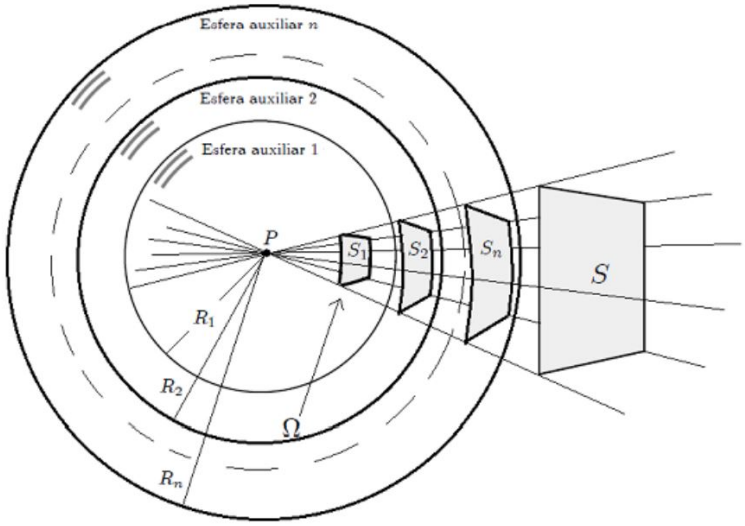


Figura 4.13: Ángulo sólido Ω en una esfera. [10]

A partir de la definición del ángulo sólido [10], se tiene que:

$$\Omega = \int_S \frac{Cos\sigma dS}{R^2} \tag{4.26}$$

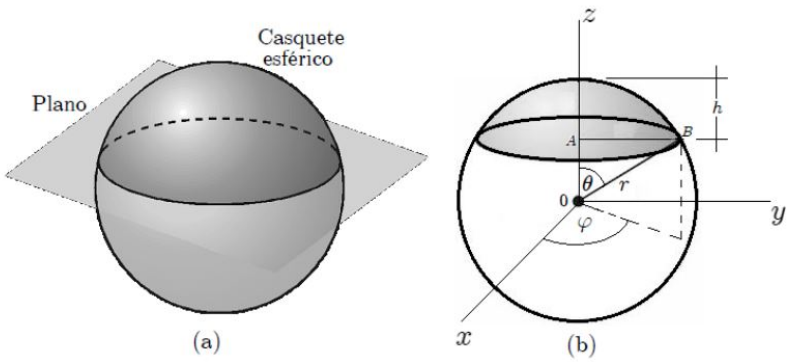


Figura 4.14: Casquete esférico (a) y cálculo de ángulo sólido (b). [10]

Para el caso en que $\sigma = 0$ y R es igual al radio de la esfera para cualquier punto sobre S. Se obtiene:

$$\Omega = \frac{1}{R^2} \int_S dS \tag{4.27}$$

$$\Omega = \frac{S}{R^2} \tag{4.28}$$

El ángulo sólido subtendido por un casquete esférico (**figura 4.14**), muestra la siguiente área:

$$S = 2\pi rh \tag{4.29}$$

Para encontrar al triangulo OAB se determina que:

$$Cos\theta = \frac{r-h}{r} \tag{4.30}$$

Despejando la altura “h” se obtiene lo siguiente:

$$h = r(1 - Cos\theta) \tag{4.31}$$

Que al sustituir “h”(**ecuación 4.29**) en la **ecuación 4.31** se obtiene:

$$S = 2\pi r^2(1 - cos\theta) \tag{4.32}$$

Finalmente al sustituir “S”(**ecuación 4.28**) en la **ecuación 4.32** se obtiene la formula del Ángulo Sólido:

$$\Omega = 2\pi(1 - cos\theta) \tag{4.33}$$

Ángulo sólido subtendido por un disco

En la **figura 4.15** se muestra un disco de superficie “S” y de radio “b” que se encuentra a una distancia “h” de un punto de origen “P” ubicado en su eje de simetría. Se calculará el ángulo sólido Ω subtendido por el disco con respecto al punto “P” de tal forma que se podrá proyectar al angulo sólido en una superficie bidimensional como la cara superior de un cilindro.

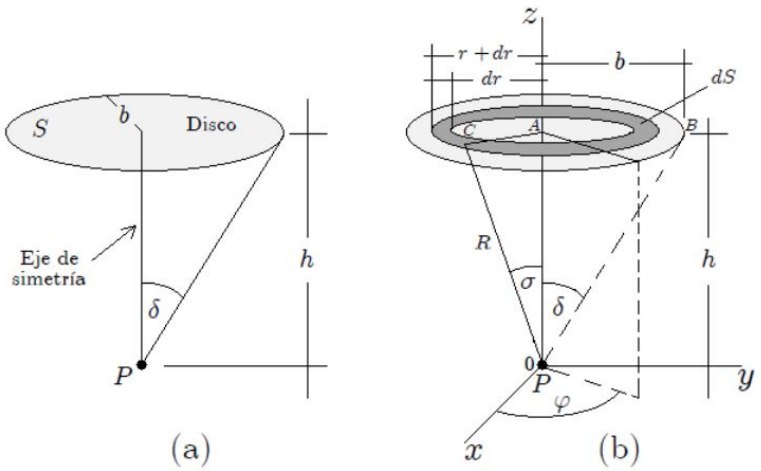


Figura 4.15: Disco de radio “b” (a) y cálculo de ángulo sólido “Ω” subtendido por el disco (b). [10]

Utilizando coordenadas cilíndricas, el radio interno de una sección del área “S” esta definida por $r + dr$. De manera que la superficie de cada corona circular viene dada por:

$$dS = \pi(r + dr)^2 - \pi r^2 = 2\pi r dr \tag{4.34}$$

Donde se ha despreciado el termino de segundo orden de dr', debido a que es infinitesimalmente pequeño. Posteriormente se determina por el triangulo APC, que cada punto sobre la corona circular que esta a una distancia de:

$$R = \sqrt{h^2 + r^2} \tag{4.35}$$

Y ademas se debe considerar:

$$Cos\sigma = \frac{h}{r} \tag{4.36}$$

Entonces a partir de la definicion del ángulo sólido [10], se retoma la **ecuación 4.26**:

$$\Omega = \int_S \frac{Cos\sigma dS}{R^2} \tag{4.37}$$

Ahora bien, al sustituir la **ecuación 4.34**, **4.35** y **4.36**, en la **ecuación 4.37** se obtiene:

$$\Omega = 2\pi h \int_S \frac{rdr}{(h^2 + r^2)^{3/2}} \tag{4.38}$$

Que al ser integrado resulta finalmente en:

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + b^2}}\right) \tag{4.39}$$

El ángulo sólido es posible escribirlo en función del ángulo δ. En efecto, apartir del triangulo ABP es facil determinar que:

$$Tan\delta = \frac{b}{h} \tag{4.40}$$

Que quedara expresado como:

$$b = hTan\delta \tag{4.41}$$

Que al ser sustituido en la **ecuación 4.33** se obtiene:

$$\Omega = 2\pi(1 - Cos\delta) \tag{4.42}$$

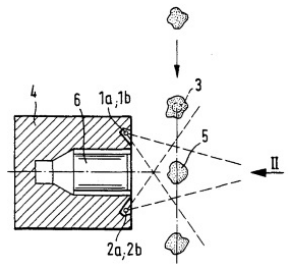
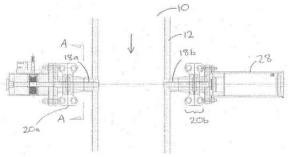
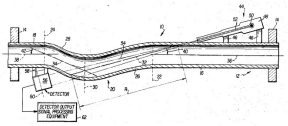
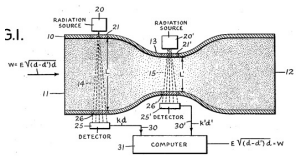
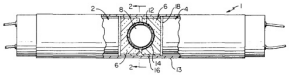
Por ultimo, si δ es pequeño entonces $Cos\delta \approx 1 - \frac{1}{2}\delta^2$ por lo que la **ecuación 4.42** puede escribirse como:

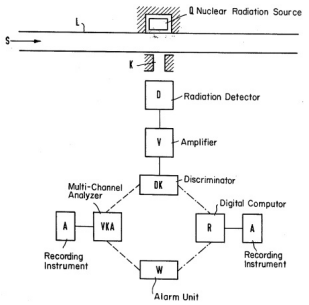
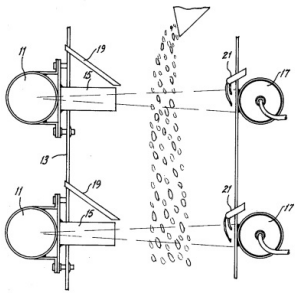
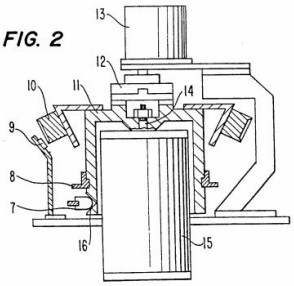
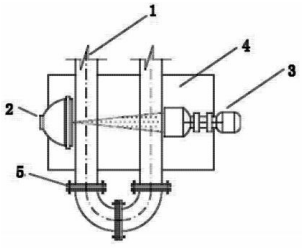
$$\Omega = \pi\delta^2 \tag{4.43}$$

4.3 Patentes de invención

La **tabla 4.1** resume las patentes relacionadas con el densímetro, ya sea sobre la óptica de los Tubos Fotomultiplicadores o los Cristales Centelleadores, el diseño de las abrazaderas, o los tipos de Colimadores (shielding). En esta búsqueda se utilizaron los motores **European Patent Office** y **freepatentonline.com**.

Tabla 4.1: Tabla de patentes relacionadas con las partes del densímetro

N^o Patente	Función	Resumen	Año	Figura
U.S.Patent 4,520,267	Método y aparato para analizar oro por radiación gamma	Cada pieza de oro cae en caída libre y es irradiada por dos fuentes de radiación que operan a diferentes niveles de energía. Una con efecto de "scattering" donde el efecto Compton se realiza en un nivel, y la otra fuente trabaja en otro nivel con efecto Compton y Fotoeléctrico.	1980	
U.S.Patent 0,137,808 $A1$	Aparato para medir densidad	Equipo medidor de densidad aparente de un fluido dentro de un recipiente que contiene una fuente de radiación y al menos un tubo de titanio que traspasa la muralla del recipiente hasta el receptor.	2008	
U.S.Patent 3,787,683	Válvula de radiación para medir densidad de fluidos	Válvula de radiación para medir densidades en fluidos.	1974	
U.S.Patent 2,953,681	Sistema para medir indices de flujos de masas por radiación	Este invento se relaciona a un sistema cuyo flujo de masa se compara con factores de velocidad de flujo.	1954	
U.S.Patent 3,898,463	Aparato contador de centelleo	Un aparato contador de centelleo es puesto a disposición el cual mide crecimientos de centelleo para radiación gamma y beta.	1975	

N^o Patente	Función	Resumen	Año	Figura
U.S.Patent 3,928,127	Método para determinar fluctuaciones rápidas de densidad de líquidos de enfriamiento para reactores nucleares	El líquido enfriador, del reactor nuclear, que fluye por la tubería, es constantemente irradiado. Las señales de eventos son entregadas por numerosos periféricos tales como un amplificador, un discriminador, un analizador multicanal.	1975	
U.S.Patent 4,205,230	Medidor de indice de flujo sólido de materiales	Un flujo de radiación controlado lee una libre caída de material. Donde otro par de sensores conectados a un computador miden la densidad del flujo.	1980	
U.S.Patent 5,073,915	Densímetro toma medidas de metales extraños en tierra	Rápidas tomas de medidas de concentraciones en varias soluciones metálicas buscan metales raros en planta de procesado o en plantas de re-procesado de combustibles.	1991	
U.S.Patent 103,185,685	Método y estructura para mejorar precisión de medición de densímetro nuclear	Comparado al estado del arte actual, la medición de flujos en una disposición en forma de U aumenta los canales de medición a dos y se puede calcular la pared de la tubería dos veces.	2013	

Capítulo 5

Etapas del Diseño Conceptual

Basado en el diseño del densímetro común, se realizará un análisis de los atributos que se necesitan para hacer competente al diseño del densímetro con etiquetador. Estos mismos atributos serán aplicados para el diseño del **Litodensitometro**. Posteriormente se clasificaran estos atributos para realizar un análisis de objetivos y competidores. De esta forma se podrá generar un análisis de **Casa de Calidad(QFD)**.

5.1 Listado de atributos

Teniendo en mente los problemas que implica trabajar con un densímetro nuclear, se necesita plantear una lista de necesidades que especifiquen cada uno de los requerimientos del diseño. La lista de todas las necesidades que el densímetro con etiquetador y el densimetro doble(**Litodensitometro**) deben cumplir:

1. **Control a distancia**
2. **Bajo costo de equipo**
3. **Bajo costo de operación**
4. **Bajo costo de mantención**
5. **Posee un fácil alineamiento**
6. **Resistente al desgaste y corrosión**
7. **Acceso fácil para el mantenimiento**
8. **No cambia la forma al tubo de concentrado**
9. **Tomar medidas de densidad en tiempo real**
10. **Protege de contaminación por dispersión de la fuente**
11. **Medir densidad sin necesidad de extraer muestra**
12. **El diámetros mínimo de tubería debe ser** $6[pulg]$
13. **El equipo pesa al menos** $35[Kg]$
14. **Temperaturas de operación entre** $-10°C$ **y** $40°C$
15. **Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina**

16. **Rápido cambio de los cristales centelleadores y PMT**
17. **Permite trabajar con varios tipos de flujos**
18. **Se detiene fácil y rápidamente**
19. **Enciende y trabaja de forma eficaz**
20. **Entrega y guarda información automáticamente**
21. **Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante**
22. **Irradiar haz gamma en zona controlada y vectorizada por el fabricante**
23. **Discriminar y medir los componentes del flujo**
24. **Fácil de ensamblar y desensamblar**

5.2 Objetivos, restricciones y funciones

Del listado de atributos antes mencionado, se extraen sus partes y se separan en objetivos, restricciones y funciones de diseño. Donde los objetivos serán las metas que el equipo debe cumplir, las restricciones serán las limitaciones del diseño del densímetro, y las funciones serán las distintas tareas que el equipo debe desarrollar.

Objetivos

1. **Control a distancia**
2. **Bajo costo de equipo**
3. **Bajo costo de operación**
4. **Bajo costo de mantención**
5. **Posee un fácil alineamiento**
6. **Resistente al desgaste y corrosión**
7. **Acceso fácil para el mantenimiento**
8. **No cambia la forma del tubo de concentrado**
9. **Protege de contaminación por dispersión de la fuente**
10. **Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina**
11. **Rápido cambio de cristales centelleadores y PMT**
12. **Permite trabajar con varios tipos de flujos**
13. **Se detiene fácil y rápidamente**
14. **Enciende y trabaja de forma eficaz**
15. **Entrega y guarda información automáticamente**
16. **Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante**
17. **Fácil de ensamblar y desensamblar**

Restricciones

1. **El diámetros mínimo de tubería es** $6[pulg]$
2. **El equipo pesa al menos** $35[Kg]$
3. **Temperaturas de operación entre** $-10°C$ **y** $40°C$

Funciones

1. **Tomar medidas de densidad en tiempo real**
2. **Medir densidad sin necesidad de extraer muestra**
3. **Irradiar haz gamma en zona controlada y vectorizada por el fabricante**
4. **Discriminar y medir los componentes del flujo**

5.3 Categorización de objetivos

En el párrafo anterior los puntos abordados en objetivos, serán organizados por grupos que posean similitud entre ellos. Estos serán agrupados en los siguientes tópicos:

Operación

- **Control a distancia**
- **Entrega y guarda información automáticamente**
- **Enciende y trabaja de forma eficaz**
- **Se detiene fácil y rápidamente**
- **Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina**

Versatilidad

- **Posee un fácil alineamiento**
- **Acceso fácil para el mantenimiento**
- **Permite trabajar con varios tipos de flujos**
- **Fácil de ensamblar y desensamblar**
- **Rápido cambio cristal Centellador y PMT**
- **Resistente al desgaste y la corrosión**

Costos

- **Bajo costo de equipo**
- **Bajo costo de operación**
- **Bajo costo de mantención**

Seguridad

- **Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante**
- **Protege de contaminación por dispersión de la fuente**
- **No causa daño al tubo de concentrado**

5.4 Jerarquización de objetivos

La **tabla 5.1** muestra los objetivos del diseño que son evaluados por el propio diseñador, y estos son ordenados según su nivel de importancia. Lo cual resaltara los puntos más importantes en los que habrá que enfocarse en el diseño del densímetro:

Tabla 5.1: Jerarquización de objetivos

#	Operación	Versatilidad
1	Enciende y trabaja de forma eficaz	Permite trabajar con varios tipos de flujos
2	Entrega y guarda información automáticamente	Acceso fácil para el mantenimiento
3	Se detiene fácil y rápidamente	Rápido cambio cristal Centelleador y PMT
4	Control a distancia	Posee un fácil alineamiento
5	Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina	Fácil de ensamblar y desensamblar
6		Resistente al desgaste y la corrosión
#	Seguridad	Costos
1	Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante	Bajo costo de equipo
2	Protege de contaminación por dispersión de la fuente	Bajo costo de operación
3	No cambia la forma del tubo de concentrado	Bajo costo de mantención

5.5 Listas de objetivos argumentada

Utilizando la **tabla 5.1**, se le agregan a esta las **restricciones y funciones** que también fueron nombradas anteriormente nombradas en el **punto 5.2**. De esta forma, en la **tabla 5.2** se mostrará una mejor idea de cómo se relacionan los objetivos mencionados.

Tabla 5.2: Listas de objetivos argumentada

#	Operación	#	Versatilidad
1	Enciende y trabaja de forma eficaz	1	Permite trabajar con varios tipos de flujos
2	Entrega y guarda información automáticamente	2	Acceso fácil para el mantenimiento
3	Se detiene fácil y rápidamente	3	Rápido cambio cristal Centelleador y PMT
4	Control a distancia	4	Posee un fácil alineamiento
5	Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina	5	Fácil de ensamblar y desensamblar
6		6	Resistente al desgaste y la corrosión
F.1	Tomar medidas de densidad en tiempo real	F.2	Discriminar y medir componentes del flujo
R.1	Temperaturas de operación entre $-10°C$ y $40°C$	R.2	El diámetro mínimo de tubería es $6[pulg]$
		R.3	El equipo pesa al menos $35[Kg]$
#	Seguridad	#	Costos
1	Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante	1	Bajo costo de equipo
2	Protege de contaminación por dispersión de la fuente	2	Bajo costo de operación
3	No cambia la forma del tubo de concentrado	3	Bajo costo de mantención
F.3	Irradiar haz gamma en zona controlada y vectorizada por el fabricante	F.4	Medir densidad sin necesidad de extraer muestra

5.6 Lista de objetivos con pesos ponderados

Con el objetivo de ordenar los objetivos de diseño en base a un método de toma de decisiones, donde no intercede el criterio del diseñador. En la siguiente **tabla 5.3** se calculan los pesos relativos de los grupos y absolutos de los objetivos, para lo cual se utiliza la escala de importancia creada por **Saaty(1986)**, llamada "**Proceso Analítico Jerárquico**". El cual optimiza la toma de decisiones complejas cuando existen múltiples criterios necesarios, para evaluar cual grupo y objetivo es más importante.

Tabla 5.3: Lista de objetivos con pesos ponderados

Operación	Absoluto	Versatilidad	Peso Absoluto
Enciende y trabaja de forma eficaz	0,016	Permite trabajar con varios tipos de flujos	0,073
Entrega y guarda información automáticamente	0,015	Rápido cambio cristal Centelleador y PMT	0,038
Se detiene fácil y rápidamente	0,007	Acceso fácil para el mantenimiento	0,043
Control a distancia	0,003	Posee un fácil alineamiento	0,032
Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina	0,002	Fácil de ensamblar y desensamblar	0,008
		Resistente al desgaste y la corrosión	0,006
Peso Absoluto Total	0,043	Peso Absoluto Total	0,200
Seguridad	Peso Absoluto	Costos	Peso Absoluto
Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante	0,303	Bajo costo de equipo	0,137
Protege de contaminación por dispersión de la fuente	0,145	Bajo costo de operación	0,103
No cambia la forma del tubo de concentrado	0,031	Bajo costo de mantención	0,038
Peso Absoluto Total	0,479	Peso Absoluto Total	0,278

5.7 Análisis funcional

El diseño conceptual está ligado a términos relacionados al: orden, plan, estructura, sistema, idea, proyecto, programa y estrategia. Todos estos conceptos guardan relación con las actividades que implican la creación de ideas y como implementarlas en el actual proyecto.

Es por esto que definiremos al "**Enfoque creativo**" como el proceso donde ocurre la chispa creativa del autor, y posteriormente definir al "**Enfoque racional**" como el proceso que separa al diseño conceptual en procesos racionales que son completamente explicables, y que deben ser definidos a partir de una estructura ordenada que veremos a continuación.

En los siguientes párrafos estableceremos las funciones del producto a diseñar, donde destacaremos los flujos de entrada y salidas que tendrá el sistema a diseñar. Para esto se utilizan "Enfoques racionales" del proceso de diseño, llamados "**Caja negra**", "**Caja transparente**", "**Benchmarking**", "**Lista de requerimientos**", "**Matriz requerimientos-Objetivos**" y "**La casa de la calidad**(QFD)".

5.7.1 Modelo de caja negra densímetro doble

Enfoque que valora la importancia del subconsciente del diseñador en el proceso del diseño. Donde se considera que el diseñador es capaz de producir resultados confiables y que a menudo tienen éxito, pero este no es capaz de explicar como llegó a tal resultado (**Jones, 1976**).

En la siguiente **figura 5.1**, se establecen flujos de entrada que en el caso del densímetro doble serían el concentrado de cobre, la energía necesaria para desarrollar el trabajo, y el control por parte del operario. Como salidas se tienen señales de flujo de partículas relacionadas con las lecturas de tres tubos fotomultiplicadores, de esta forma se identifican perdidas de energía medidas en dos situaciones simultáneamente, más el calibrador del etiquetador, y finalmente el flujo de salida correspondiente al concentrado de cobre irradiado. Se adjunta un esquema de este proceso.



Figura 5.1: Modelo de caja negra

5.7.2 Modelo de caja transparente densímetro doble

Este enfoque consta de tres fases:

1. **Divergencia (Análisis):** Es un análisis de la estabilidad de todo lo que está conectado con el problema, para identificar lo que es susceptible de cambio y lo que se puede considerar como puntos fijos de referencia.

2. **Transformación (Síntesis):** Es la etapa de elaboración de un modelo de carácter general, considerado adecuado pero sin posibilidades de comprobación.

3. **Convergencia (Evaluación):** Es la etapa posterior a la definición del problema, a la identificación de las variables y al acuerdo de los objetivos. El objetivo es alcanzar una reducción progresiva de las incertidumbres secundarias hasta llegar a una solución final.

Para el proceso creativo del densímetro, se mostrarán las sub-funciones que permiten convertir los flujos de entrada en los flujos de salida del modelo mencionado. Estas sub-funciones son mostradas en un esquema(**figura 5.2**) que, a diferencia de la caja negra, se le añaden los dos flujos de partículas de entrada que pertenecen a los isótopos radiactivos, entre otras equipos convertidores de señales, almacenadores de datos, etc:

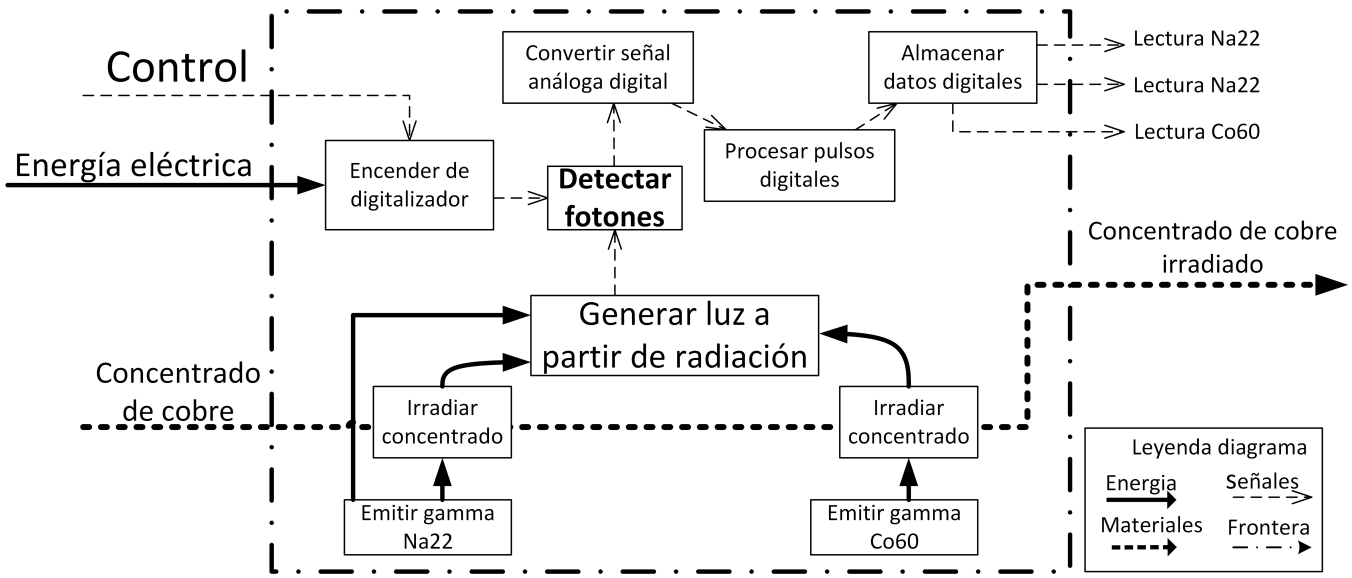


Figura 5.2: Modelo de caja transparente

5.8 Análisis de competidores

5.8.1 Principales competidores o sustitutos

En la **tabla 5.4** se muestra un resumen de los competidores que se tienen en cuenta en este estudio. Todos estos productos evaluados ya tienen trayectoria en el mercado. Algunos poseen especializaciones que se adoptaron en el diseño propuesto, como por ejemplo trabajar con fuentes de baja intensidad.

También se añadirán productos medidores de densidad que no utilizan fuentes radiactivas, pero leen densidad mediante el efecto de coriolis. Lo que conlleva a un diseño mucho más voluminoso y complicado en el control del movimiento de la tubería, pero el producto es mucho más seguro de manipular para el cliente. Aunque no posee la capacidad de trabajar con diversos tipos de fluidos, ni detectar un solo material entre el flujo de diversos contaminantes.

Tabla 5.4: Principales competidores o sustitutos

Empresa	Densímetros Nucleares similares
Ronan	Model X96S
SISTEC	Model SS200
Berthold	Model LB444
Tracerco	Model PRI 121/116
Vega	DSG Gen 2000
Empresa	Productos sustituyentes No nucleares
Krohne	Optimass 3000 Massflow Meter
Honeywell	Versaflow Coriollis Massflow Sensor

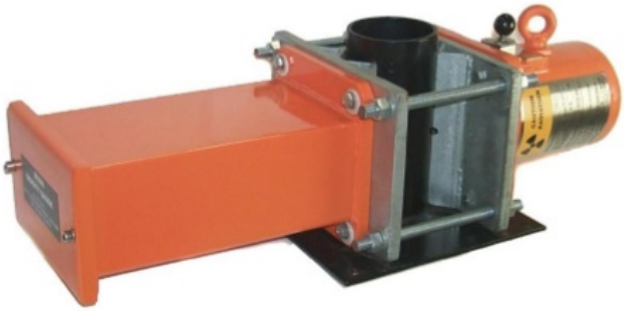
5.8.2 Benchmarking por objetivos

En esta sección se realizará una comparación enfocada en las características más fuertes de los principales competidores del diseño estudiado. En la siguiente **tabla 5.5**, se utilizarán los mismos "**Objetivos**" que usamos en la sección "**5.3 Objetivos, restricciones y funciones**", para hacer esta comparación. La comparación de realizará en base a una escala de puntaje que varía de **1 = Pésimo** a **5 = Excelente**.

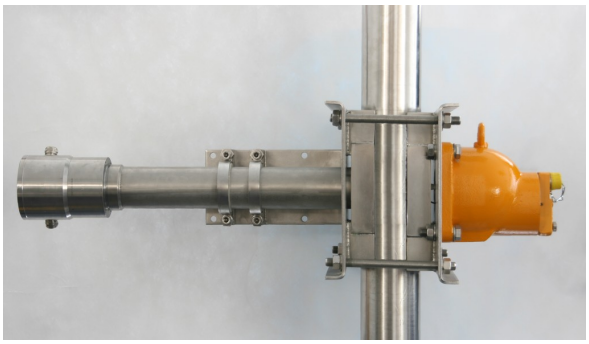
Los productos de comparación son cinco (**figura 5.3**): Empezando por el **Modelo X96S** de la marca Ronan (**figura 5.3a**), que se enfoca en trabajar con fuentes de baja intensidad a las que ella misma llama RLL (Radiation Low Level), su aplicación es leer lechadas. Seguido de esta, tenemos el **Modelo SS200** de la marca Sistec (**figura 5.3b**), que trabaja con fuentes de alta intensidad como **Co-60**, que posee un diseño muy simplista que en este documento llamaremos "densímetro simple", su aplicación más densa es lodos. Después tenemos el **Modelo LB444**, de la marca Berthold (**figura 5.3c**), el cual es similar al anterior pero más avanzado, ya que admite diversas posiciones para analizar la tubería y la protección a la radiación esta mejor diseñada, su aplicación es la minería. Luego tenemos el **Modelo PRI 121/116** de la marca Tracerco (**figura 5.3d**), el cual permite leer la densidad de líquidos de hasta 3 mezclas a la vez. Su diseño es similar a los anteriores, utiliza una fuente de **Ce-137** y se caracteriza por pesar poco. Finalmente, el último **Modelo DSG Gen2000**, de la marca Vega (**figura 5.3e**), no utiliza fuentes radiactivas, sino que utiliza rayos X para medir densidad. Es muy fácil de ensamblar ya que es una pieza única que posee un peso relativamente bajo de $7[kg]$, sin embargo está limitada a solo leer densidad en líquidos y lechadas.



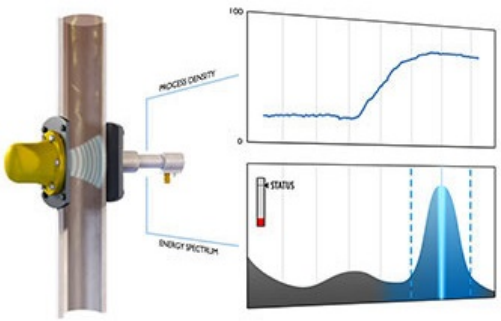
(a) Ronan X96S



(b) Sistec SS200



(c) Berthold LB444



(d) Tracerco PRI 121/116



(e) Vega DSG Gen 2000

Figura 5.3: Fotos Densímetros para Benchmarking

Tabla 5.5: Benchmarking de equipos comerciales similares

Objetivos	Densímetro Doble	Ronan M. x96S	SISTEC M. SS200	Berthold M. LB444	Tracerco PRI 121/116	Vega DSG Gen 2000
Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante	5	5	4	5	5	5
Protege de contaminación por dispersión de la fuente	5	5	5	5	5	5
Bajo costo de equipo	3	4	4	3	4	5
Bajo costo de operación	5	3	4	3	5	2
Permite trabajar con varios tipos de flujos	5	2	3	2	5	1
Acceso fácil para el mantenimiento	5	2	2	2	5	5
Bajo costo de mantención	4	3	3	3	5	5
Rápido cambio cristal Centelleadores y PMT	5	2	2	2	2	1
Posee un fácil alineamiento	5	3	3	4	5	5
No cambia la forma del tubo de concentrado	5	4	2	4	4	5
Enciende y trabaja de forma eficaz	5	4	5	5	3	4
Entrega y guarda información automáticamente	5	3	5	5	4	5
Fácil de ensamblar y desensamblar	5	3	4	3	4	4
Se detiene fácil y rápidamente	5	5	5	5	5	5
Resistente al desgaste y corrosión	5	5	5	5	5	5
Control a distancia	4	4	4	4	4	4
Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina	2	2	2	2	2	2
Promedio	4.6	3.5	3.6	3.7	4.2	4.0

5.9 Lista de requerimientos

En la siguiente tabla se mostrará una lista de las principales características del diseño, así como los requerimientos que puede pedir el consumidor. Estos requerimientos han sido clasificados en **Obligatorios (D)** y **Deseables(W)** si es posible, estableciendo un valor de referencia para cada requerimiento visualizado en la siguiente **tabla 5.6**:

Tabla 5.6: Lista de requerimientos

D W	Requerimientos
	1. Geometría
D	Ancho 210$[mm]$ y 800$[mm]$
D	Alto 210$[mm]$ y 310$[mm]$
D	Largo 300$[mm]$ y 960$[mm]$
D	Diámetro menor abrazadera 6$[pulg]$
	2. Radiación
D	Energía fuente entre 511$[keV]$ y 1332,5$[keV]$
	3. Fuerzas
D	Peso varía entre 98$[N]$ y 1177$[N]$
W	Sistema de sujeción por abrazadera menor a 170$[Mpa]$
	4. Seguridad
D	Protección contra actividades menores a 220$[\mu Ci]$
D	A 50$[cm]$ de distancia la dosis recibida es nula
	5. Transporte
W	Componentes del equipo pesan menos de 35$[Kg]$
	6. Operación
D	Rango de temperaturas entre $-10°C$ y $40°C$
D	Protección contra el polvo y humedad IP65
W	Mide densidad de al menos 3 materiales distintos
W	Humedad flujo varía entre 6 %(barro de acopio) hasta 10 %
	7. Mantenimiento
W	1 mantenciones al año al menos
W	Tiempo de cambio de piezas menor a 10$[min]$
	8. Costos
D	Costo de equipo [CLP]
D	Costo de operación [CLP]
D	Costo de mantención [CLP]

5.10 Matriz requerimientos-objetivos

Tabla 5.7 de congruencias entre **Objetivos** y **Requerimientos** marcados con un circulo que identifican las coincidencias en las fortalezas del diseño conceptual requerido. Este es el ultimo paso para ser capaz de desplegar el esquema de la casa de calidad:

Tabla 5.7: Matriz requerimientos-objetivos

Peso ponderado	Objetivos de Diseño / Métricas	Reguarda la salud del personal ante radiación ionizante	Protege de contaminación por dispersión de la fuente	Bajo costo de equipo	Bajo costo de operación	Permite trabajar con varios tipos de flujos	Acceso fácil para el mantenimiento	Bajo costo de mantención	Rápido cambio de cristal Centelleador y PMT	Posee un fácil alineamiento	No cambia la forma del tubo de concentrado	Enciende y trabaja de forma eficaz	Entrega y guarda información automáticamente	Fácil de ensamblar y desensamblar	Se detiene fácil y rápidamente	Resistente al desgaste y la corrosión	Control a distancia	Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina
0,303	Reguarda la salud del personal ante radiación ionizante																	
0,145	Protege de contaminación por dispersión de la fuente																	
0,137	Bajo costo de equipo																	
0,103	Bajo costo de operación																	
0,073	Permite trabajar con varios tipos de flujos																	
0,043	Acceso fácil para el mantenimiento																	
0,038	Bajo costo de mantención																	
0,038	Rápido cambio de cristal Centelleador y PMT																	
0,032	Posee un fácil alineamiento																	
0,031	No cambia la forma del tubo de concentrado																	
0,016	Enciende y trabaja de forma eficaz																	
0,015	Entrega y guarda información automáticamente																	
0,008	Fácil de ensamblar y desensamblar																	
0,007	Se detiene fácil y rápidamente																	
0,006	Resistente al desgaste y la corrosión																	
0,003	Control a distancia																	
0,002	Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina																	
	Ancho 210[mm] y 800[mm]													●				
	Alto 210[mm] y 310[mm]													●				
	Largo 300[mm] y 960[mm]													●				
	Diámetro menor abrazadera 6[$pulg$]									●	●			●				
	Intensidad fuente entre 511[keV] y 1332,4[keV]	●																
	Peso varía entre 98[N] y 1177[N]									●								
	Sistema de sujeción por abrazadera menor a 170[Mpa]										●							
	Protección contra actividades menores a 220[μCi]	●																
	A 50[cm] de distancia la dosis recibida es nula	●																
	Componentes del equipo pesan menos de 35[Kg]									●				●				
	Rango de temperaturas entre $-10°C$ y $40°C$											●						
	Protección contra el polvo y humedad $IP65$		●			●										●		
	Mide densidad de al menos 3 materiales distintos																	
	Humedad flujo varía entre 6 %(barro de acopio) hasta 10 %											●						
	1 mantenciones al año al menos		●									●				●		
	Tiempo de cambio de piezas menor a 10[min]								●					●				
	Costo de equipo [CLP]		●	●	●											●	●	
	Costo de operación [CLP]			●									●		●		●	●
	Costo de mantención [CLP]					●	●											

5.11 Despliegue de la función de casa de la calidad(QFD)

En la siguiente **figura 5.4**, se mostrará el despliegue de la **Casa de Calidad(QFD)**, que en la parte superior presenta las relaciones entre los requerimientos de mejora. En el centro, las relaciones entre los objetivos e diseño y las métricas de importancia. En la sección derecha se muestra un benchmarking que compara al **Litodensitometro** frente a la competencia de densímetros nucleares comerciales. Y en la sección inferior se muestran los "target value", que compara los requerimientos que deben cumplir el diseño conceptual del densímetro doble, y los que posee la competencia para satisfacer las necesidades del cliente. Desafortunadamente el análisis de costos es solo estimativo debido a que no fue posible obtener los precios de todos los densímetros comerciales. Se puede ver en detalle el análisis de casa de calidad en el **Anexo B**.

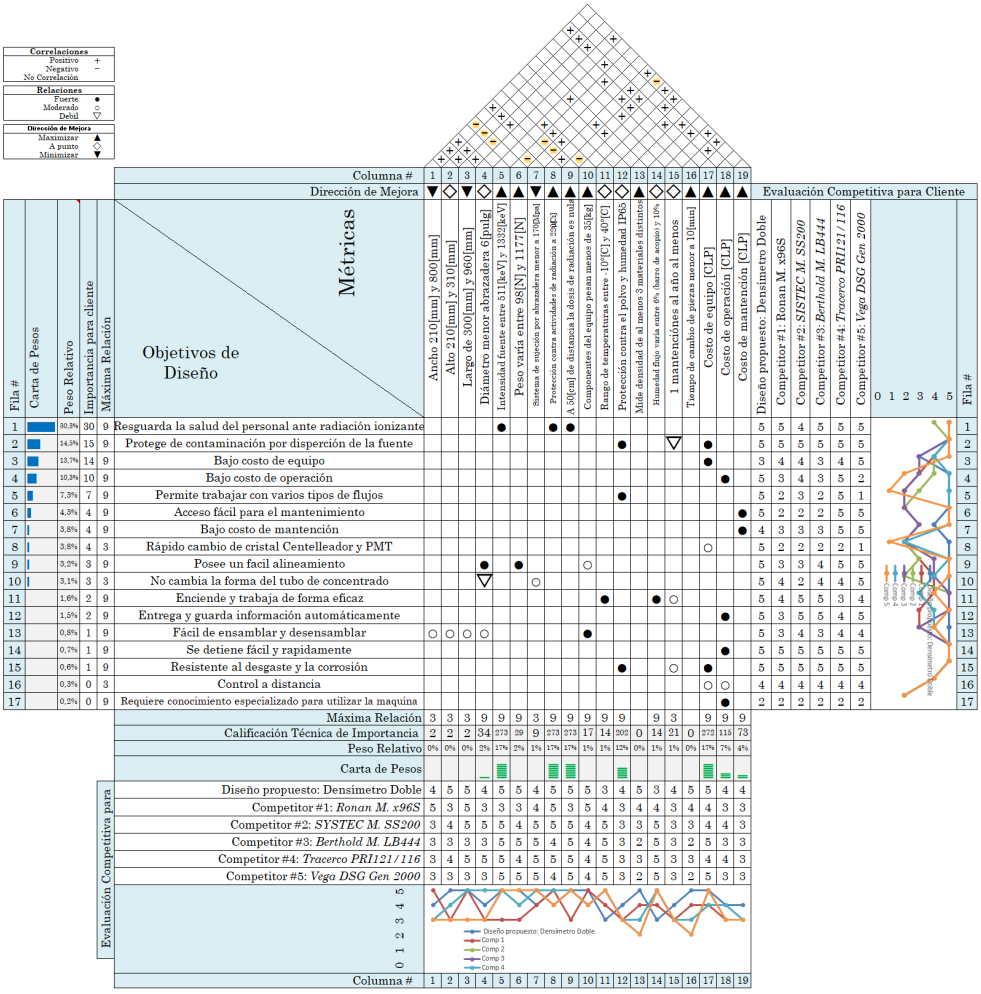


Figura 5.4: Modelo de casa de calidad(**Anexo B**)

Dentro de las contradicciones encontradas en el triangulo ubicado en la parte superior del análisis QFD, lo primero que resalta es la variación del peso. A medida que se cambian los parámetros de espesor de las paredes de plomo para conseguir una mejor protección contra la radiación, aumenta sensiblemente el peso de toda la estructura, incluyendo la estructura de acero que soporta toda la estructura. Es por esto que la mejor recomendación es guardar una distancia mínima de seguridad que para este caso es $50[cm]$, sin embargo este parámetro no ayuda del todo al personal que debe hacer mantención al equipo.

En el análisis Benchmark (**Tabla 5.5**) se puede apreciar que el modelo de **Tracerco PRI 121/116** es lo mas cercano a lo que postula el diseño conceptual de esta memoria. Siendo el modelo **Ronan M. 96S** el mas débil dentro de esta comparación.

En cuanto a los "Targets" o requerimientos buscados, se identifica que el modelo **Systec M. SS200** cumple todos los parámetros de seguridad contra la radiación a un bajo costo de equipo. El valor de costos es estimativo y se evaluó la complejidad del diseño entre los cinco elegidos, siendo este ultimo mencionado el mas simple. Nuevamente se repite el modelo de **Tracerco PRI 121/116** como un modelo competente en los requerimientos de seguridad debido a que este modelo posee una mantención simple y rápida, gracias a un mecanismo detector de radiación desmontable en la parte posterior, Sin embargo este diseño es estimativamente mas caro que el **Systec M. SS200**.

5.12 Resolución de contradicciones de los requerimientos

Anteriormente en el análisis QFD se mencionaron las correlaciones de las métricas. Esta sección tiene por objetivo trabajar con aquellas correlaciones que son contradictorias, en relación a su dirección de mejora. Para resolver estas contradicciones se utilizará como apoyo el **método TRIZ**(**tabla 5.8**).

Tabla 5.8: Principales competidores o sustitutos

Problema particular	Problema general	Solución general	Solución particular
Ancho, alto y largo **VS** Peso varía entre 98$[N]$ y 1177$[N]$	**8.**Volumen de un objeto **VS 2.**Peso de un objeto	**2.**Extracción	La máquina puede ser separada en diversas partes para separar el peso
Peso varía entre 98$[N]$ y 1177$[N]$ **VS** Sistema de sujeción por abrazadera menor a 170$[MPa]$	**10.**Fuerza **VS 31.**Efectos secundarios dañinos	**24.**Mediador	Mejorar roce de abrazadera agregando una lámina de caucho
Peso varía entre 98$[N]$ y 1177$[N]$ **VS** A 50$[cm]$ de distancia la dosis de radiación es nula	**10.**Fuerza **VS 31.**Efectos secundarios dañinos	**9.**Acción contraria previa	En lugar de reducir el plomo y aumentar la distancia de seguridad. Mejor aumentar el plomo para reducir la distancia de seguridad
Sistema de sujeción por abrazadera menor a 170$[MPa]$ **VS** A 50$[cm]$ de distancia la dosis de radiación es nula	**11.**Tensión, presión **VS 31.**Efectos secundarios dañinos	**27.**Objeto barato de vida corta en vez de uno caro y durable	Explicar en manual de uso de máquina que la distancia del usuario es la mejor protección
A 50$[cm]$ de distancia la dosis de radiación es nula **VS** Componentes del equipo pesan menos de 35$[Kg]$	**31.**Efectos secundarios dañinos **VS 10.**Fuerza	**9.**Acción contraria previa	En lugar de reducir el plomo para facilitar el transporte. Mejor aumentar el plomo para aumentar la seguridad
A 50$[cm]$ de distancia la dosis de radiación es nula **VS** Costo de mantención [CLP]	**31.**Efectos secundarios dañinos **VS 16.**Durabilidad de un objeto	**21.**Despachar rápidamente	Diseño modular que permite rápidamente extraer el componente a reparar

5.13 Recopilación de datos

En la presente sección se realizará un **"Análisis de Patentes"** por función. Esta consta de una búsqueda de tecnologías y equipos que realicen funciones relacionadas con el diseño del densímetro nuclear. Acto seguido se realizará una **"Carta Morfológica"** donde las funciones anteriormente mencionadas, son segregadas en conceptos clave que puedan llenar ciertas características necesarias para el modelo propuesto. Posteriormente viene la realización de un **"Brainstorming"** que promueve la generación de una gran cantidad de ideas relacionadas al nuevo diseño. De esta forma se generan diversos hilos de alternativas u opciones que detallan al concepto lo mejor posible.

5.13.1 Análisis de patentes por función

Las funciones propuestas en la **tabla 5.9** y utilizando la **Lista de objetivos argumentada punto 5.5**, se relacionan con las patentes de importancia para este proyecto nombradas en el **punto 4.1**. De esta forma se pueden entender los puntos claves que se busca en el diseño del densímetro y que ya se encuentran patentados en el mercado.

Tabla 5.9: Análisis de patentes por función

Función	N° Patente US	Descripción
Tomar medidas de densidad en tiempo real	$3,787,683$	Válvula de radiación para medir densidad de fluidos
	$4,520,267$	Método para determinar fluctuaciones rápidas de densidad de líquidos de enfriamiento para reactores nucleares
Discriminar y medir componentes del flujo	$2,953,681$	Sistema para medir indices de flujos de masas por radiación
	$4,520,267$	Método y aparato para analizar oro por radiación gamma
	$5,073,915$	Rápidas tomas de medidas en diversas soluciones metálicas
Detectar fotones	$3,898,463$	Aparato contador de centelleo
	$103,185,685$	Tubo U que cuenta dos veces
Generar luz a partir de radiación	$0,137,808\ A1$	Aparato para medir densidad
Procesar pulsos digitales	$4,205,230$	Medidor de indice de flujo sólido de materiales

5.13.2 Benchmarking por función

Las funciones propuestas en la **tabla 5.9**, más la **Lista de objetivos argumentada** (**tabla 5.2**), se relacionan con los modelos de densímetros de interés propuestos en el **Benchmarking por objetivos** (**tabla 5.5**). En la siguiente **tabla 5.10** se realiza una puntuación entre 1 y 5, siendo **1=muy malo** y **5=muy bueno**. Mostrando la puntuación promedio de estos modelos comparando su "performance" o rendimiento frente a las funciones clave.

Tabla 5.10: Análisis de competidores por función

Función	Densímetro Doble	Ronan M. x96S	SISTEC M. SS200	Berthold M. LB444	Tracerco PRI 121/116	Vega DSG Gen 2000
Tomar medidas de densidad en tiempo real	5	5	5	5	5	5
Discriminar y medir componentes del flujo	5	3	3	5	3	3
Detectar fotones	5	4	4	5	4	0
Generar luz a partir de radiación	5	2	4	5	2	0
Procesar pulsos digitales	5	5	4	5	5	5
Promedio	5	3,8	4	5	3,8	2,6

5.13.3 Brainstorming

El diagrama de **Lluvia de Ideas** (**figura 5.5**), constituye un método eficaz para resolver problemas de orden de funciones y características de interés en el diseño del densímetro nuclear. Las funciones son obtenidas del diagrama de ”Caja Transparente” (**figura 5.2**). Donde estas son ordenadas tanto en paralelo como en serie para explicar el funcionamiento del equipo.

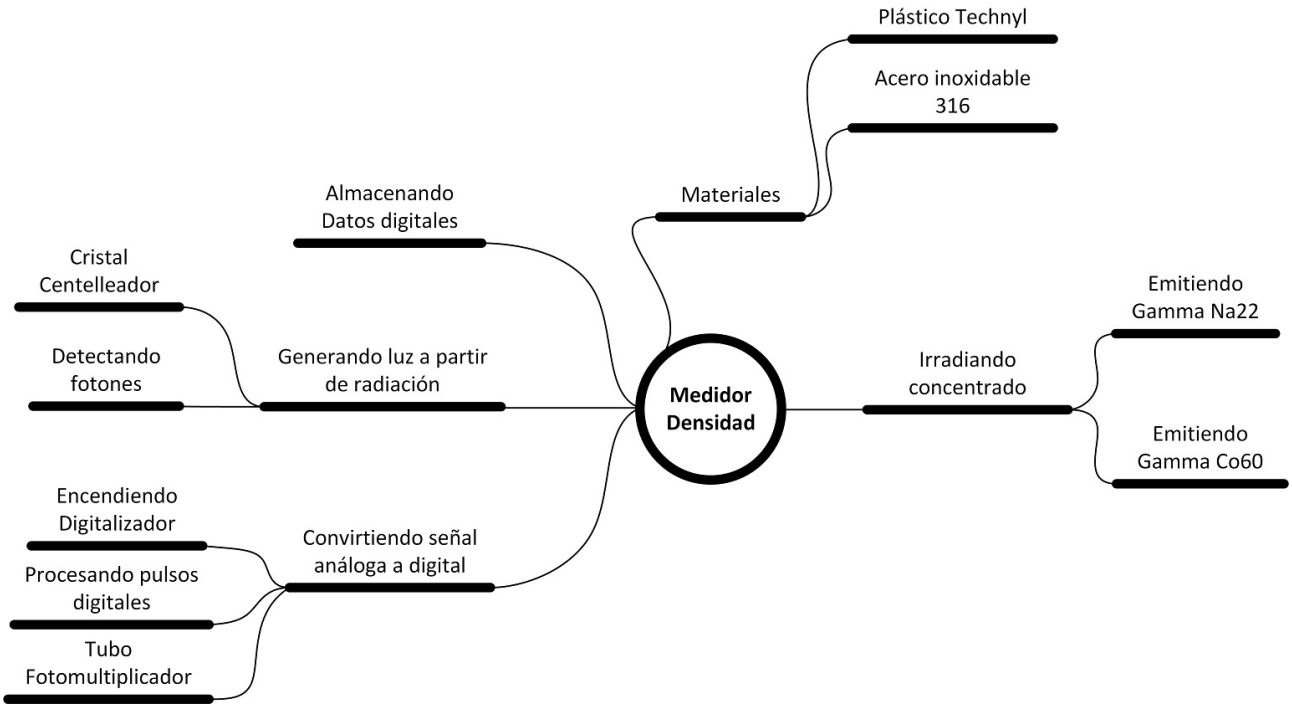
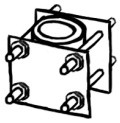
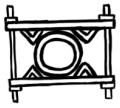


Figura 5.5: Brainstorming de funciones

5.13.4 Carta Morfológica

En la siguiente carta morfológica (**figura 5.10**), se mostrarán diversos diseños para solucionar determinadas funciones y sub-funciones que puede presentar el sistema. Posteriormente estas opciones serán utilizadas para trazar un camino de solución para diseñar un equipo competente a las necesidades requeridas.

Tabla 5.11: Principales competidores o sustitutos

Función	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Modelo Densímetro	Modelo común 	Modelo con etiquetador 	Modelo Litodensitometro 
Interfaz	Ensamble por abrazadera 	Fijación por soldadura 	Ensamble por flanges y pernos 
Abrazador	Abrazador por planchas y espárragos 	Abrazadera de tubo 	Perfil circular y pernos 
Alineador	Perfiles en ”V” y espárragos 	Estructura de acople 	Estructura integrada al tubo 
Disparador	Gatillo vertical indirecto 	Gatillo telescópico 	Gatillo electrónico 

5.13.5 Generación de conceptos

Una vez recopilados los datos obtenidos de la **Carta Morfológica** y los otros puntos antes mencionados, se evaluarán posibles soluciones de conceptos que puedan cumplir los requerimientos necesarios para el diseño conceptual del densímetro.

Concepto 1

Se deja de lado el sistema de abrazadera común y se utiliza un elaborado diseño de tubería de acero inoxidable que ira directamente acoplado al tubo de concentrado minero, el cual requerirá de una instalación especializada y un acuerdo con la minera. La ventaja de este diseño radica en la hermeticidad del sistema y un contacto casi directo con el concentrado de cobre, para tomar mediciones sin capas de acero que interfieran y generen atenuaciones no deseadas. El diseño de esta tubería necesitará un sistema de roscado para posicionar y retirar la fuente, y el detector gamma. Como fuentes de radiación gamma se pueden utilizar de baja energía gracias a la cercanía que esta tendrá con el concentrado de cobre. La alineación de la fuente con el detector estará naturalmente alineada ya que la interfaz atornillable de la tubería se encargara de alinear estas al momento de fijarlas con el sistema de roscado (**figura 5.6**).

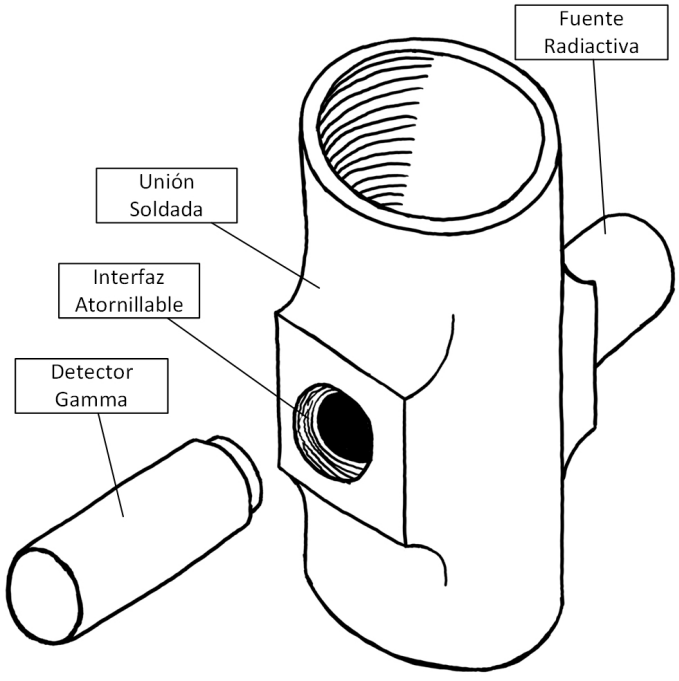


Figura 5.6: Diseño concepto 1

Concepto 2

En este concepto se utiliza un sistema de abrazadera que consiste en cuatro espárragos de acero inoxidable que van apernados a dos planchas soportantes, también de acero inoxidable, que sostendrán a la fuente y al detector gamma. Este diseño no compromete a la tubería de concentrado de la minera por lo que no se requerirá realizar cambios a esta, sin embargo las fuentes de radiación gamma deberán ser un poco mas potentes para traspasar al acero y alcanzar al concentrado de cobre. Las placas soportantes cuentan con un sistema de flanges que posicionaran una fuente o detector intercambiables, sin embargo la alineación de las planchas soportantes será comprometida debido a que el sistema de abrazadera por espárragos no es tan precisa (**figura 5.7**).

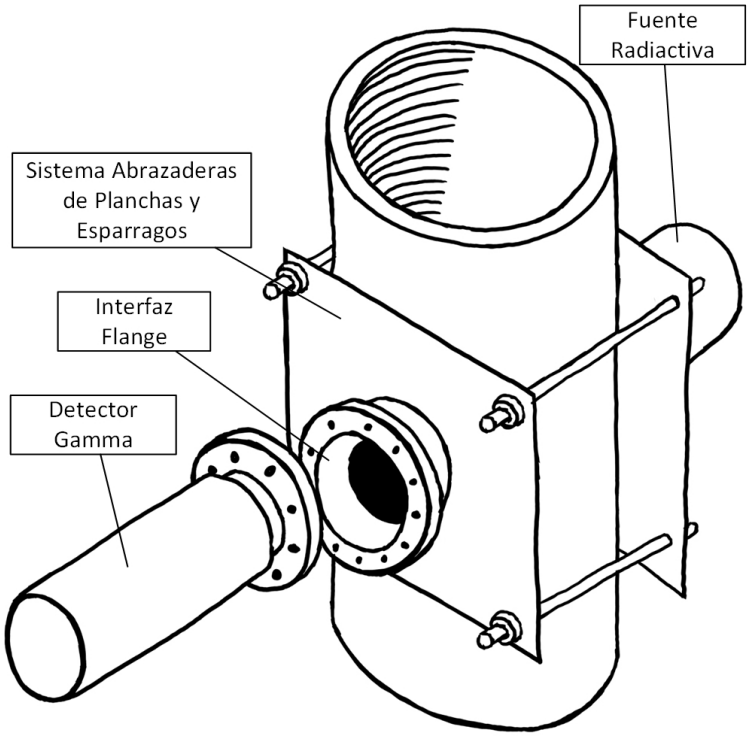


Figura 5.7: Diseño concepto 2

Concepto 3

Se elige trabajar con un sistema de abrazadera estandarizado muy similar a las abrazaderas utilizadas en telescopios. Estas abrazaderas requerirán ser modificadas para tener dos interfaces que soporten placas soportantes de acero inoxidable que sostendrán a la fuente y al detector gamma. La alineación de estas abrazaderas será relativamente sencilla, ya que el mismo diseño de la abrazadera estandarizada se alinea con la forma del cilíndrica del tubo. Se requerirá utilizar fuentes de mediana a alta potencia para tomar mediciones que atraviesen al acero inoxidable (**figura 5.8**).

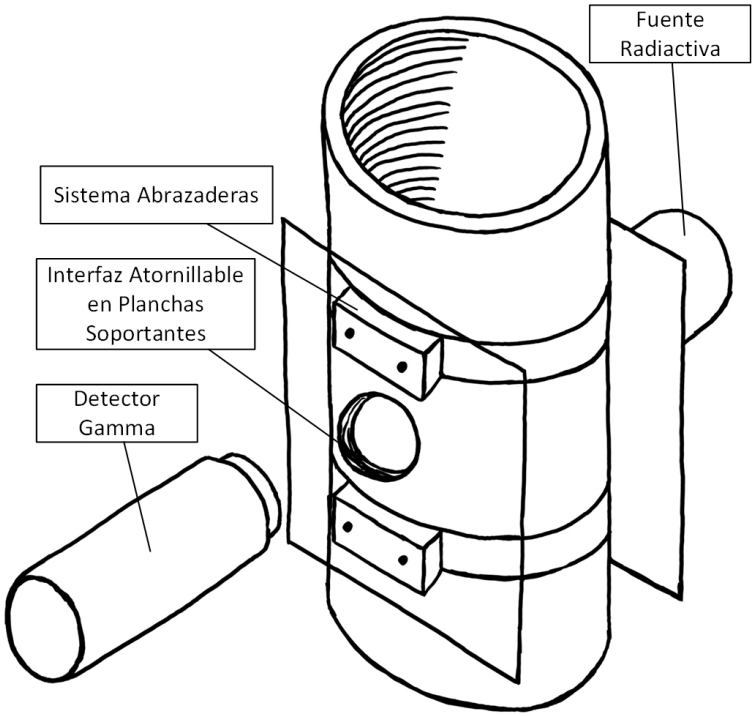


Figura 5.8: Diseño concepto 3

5.13.6 Selección de concepto

Después de plantear los conceptos de diseño del densímetro, se procede a elegir uno para desarrollar en base al criterio de método de selección de pesos ponderados.

Método de selección de pesos ponderados

Para calcular la alternativa que resulte mas competitiva de acuerdo a los objetivos del diseño, se realizará un calculo en el cual se utilizarán los pesos ponderados medidos en la **tabla 5.3**, que también puede verse ordenada del mayor al menor importante en la **tabla 5.7**.

Como resultado en la **tabla 5.12** el concepto 2 es el que obtiene el puntaje mas alto, pero por un leve margen. Esto es debido a que las funciones clave para distinguir al densímetro de la competencia no dependen exactamente del fácil ensamblaje o mantenimiento, sino de la seguridad del personal que es un tema que se repite en los tres conceptos. La mayor distinción entre los tres conceptos es en la facilidad de ensamblar y desensamlar donde el primer concepto cae a un puesto debido a que esta ideado para estar permanentemente fijo en el tubo de concentrado minero.

Tabla 5.12: Resultados pesos ponderados de Conceptos

		Concepto 1		**Concepto 2**		**Concepto 3**	
Objetivos de diseño	**Peso**	**Rate**	**Peso**	**Rate**	**Peso**	**Rate**	**Peso**
Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante	30,3	5	151,5	5	151,5	5	151,5
Protege de contaminación por dispersión de la fuente	14,5	5	72,5	5	72,5	5	72,5
Bajo costo de equipo	13,7	1	13,7	5	68,5	3	41,1
Bajo costo de operación	10,3	5	51,5	5	51,5	5	51,5
Permite trabajar con varios tipos de flujos	7,3	5	36,5	5	36,5	5	36,5
Acceso fácil para el mantenimiento	4,3	5	21,5	5	21,5	5	21,5
Bajo costo de mantención	3,8	5	19	5	19	5	19
Rápido cambio de cristal Centelleador y PMT	3,8	5	19	5	19	5	19
Posee un facil alineamiento	3,2	5	16	1	3,2	3	9,6
No cambia la forma del tubo de concentrado	3,1	1	3,1	5	15,5	5	15,5
Enciende y trabaja de forma eficaz	1,6	5	8	5	8	5	8
Entrega y guarda información automáticamente	1,5	5	7,5	5	7,5	5	7,5
Fácil de ensamblar y desensamblar	0,8	1	0,8	5	4	5	4
Se detiene fácil y rapidamente	0,7	5	3,5	5	3,5	5	3,5
Resistente al desgaste y la corrosión	0,6	5	3	5	3	5	3
Control a distancia	0,3	5	1,5	5	1,5	5	1,5
Requiere conocimiento especializado para utilizar la maquina	0,2	5	1	5	1	5	1
Total scoring		429,6		487,2		466,2	
Ranking		Tercero		Primero		Segundo	

Capítulo 6

Diseño Básico

En esta sección se explicará el proceso completo del diseño mecánico conceptual del Densímetro con etiquetador, donde también se recalca que este diseño de densímetro fue realmente construido y por eso habrá un punto de vista desde la realidad del diseño ya construido. Posterior al estudio de este diseño se hará una ampliación de este mismo al diseño del **Litodensitometro**.

Primero se hará el estudio de un densímetro común, analizando sus dimensiones, materiales, tipo de abrazadera o sujeción utilizada, normas de seguridad, etc. El siguiente paso será mostrar en detalle el diseño del densímetro con etiquetador, señalando cada una de sus partes, dimensiones, materiales usados, y ángulo sólido. Ademas se enseñara a calcular el espesor de pared de protección contra la radiación, haciendo uso de lo aprendido en las unidades anteriores.

6.1 Estudio de densímetro Systec Modelo SS200

El diseño del modelo **Systec SS200**(**figura 6.1**) es el estandar que representa a un densímetro común. Como se menciono anteriormente, este diseño esta compuesto por una fuente radiactiva, un detector gamma y se le debe sumar un calibrador, el cual esta separado de la estructura principal. En la siguiente **tabla 6.1**, se pueden ver las características esenciales del modelo, que contempla un contenedor cilíndrico para la fuente y un perfil rectangular en el detector gamma:



Figura 6.1: Foto densímetro Systec.

Tabla 6.1: Parámetros mecánicos densímetro Systec

Parámetro	Tipo o cantidad
Sostenedor Fuente	Acero inoxidable 316, $IP65$, Rellenado con epoxy-plomo
Radioisótopo	$Cs137$, $1,11[Gbq]$ actividad de alta energía
Detector Gamma	$IP67$, Acero Inoxidable 316
Unidad de control	$IP67$, Acero Inoxidable 316
Temperatura de Operación	0° a 60°
Vibración	$0[Hz]$ a $100[Hz]$
Humedad	5 a 95 $\%RH$
Peso	Sostenedor Fuente $50[Kg]$ Detector Gamma $40[Kg]$

Calibrador PSL200

Un ejemplo de calibrador para un densímetro común es el modelo PSL200 desarrollado por Systec(**figura 6.2**). El diseño cuenta con una balanza electronica de 3 decimales para medir la gravedad especifica(1,000 hasta 9,999) y 2 decimales para medir sólidos en porcentajes(0 % hasta 100 %), mas un balde contenedor de acero inoxidable 316. La balanza trabaja sin requerir una preparación o calculo previo, primero se toma una medición del contenedor con agua para calibrar la gravedad especifica y posteriormente se configura la densidad del sólido a medir.

La desventaja de este modelo es el tiempo utilizado para apartar una muestra que debe ser totalmente secada(libre de humedad) y posteriormente medida. Debido a que no existe un control continuo de la potencia de la fuente, se debe hacer una programación de calibraciones cada cierto tiempo para evitar errores de medición.



Figura 6.2: Balanza calibradora Systec.

6.1.1 Estudio de medidas de densímetro Systec

En la **figura 6.3**(**Anexo G**) se puede apreciar cómo el diseño del modelo SS200 de Systec puede variar según el diámetro de la tubería del flujo a medir. Este diseño posee dos parámetros: ”X” e ”Y” que representan a la longitud del espárrago y la arista más larga de la plancha sostenedora (**tabla 6.2**), que también es usada de abrazadera, respectivamente. La variable ”Z” representa la posición de los pernos de anclaje que sujetarán a la fuente y el detector gamma, con sus respectivas planchas sostenedoras. Esta medida también varía respecto al diámetro del tubo de flujo de material.

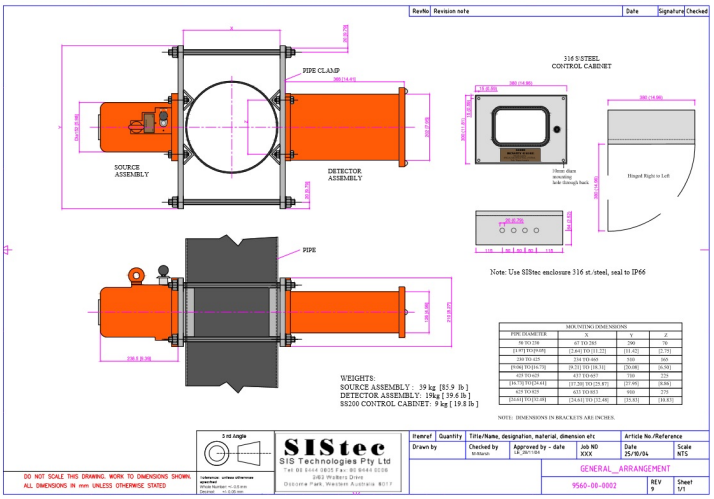


Figura 6.3: Foto densímetro Systec.

Tabla 6.2: Medidas generales densímetro Systec

Parámetro	Medidas
Sostenedor Fuente	Diámetro: 152$[mm]$ Largo: 239$[mm]$
Detector Gamma	Perfil rectangular: 202 x 126$[mm]$ Largo: 366$[mm]$
Espárragos	$M10[mm]$ x $X[mm]$
Plancha sostenedora	Perfil rectangular: 210 x $Y[mm]$
Gabinete de control	Caja: 380 x 300$[mm]$ x 380$[mm]$
X varía entre	67$[mm]$ a 853$[mm]$
Y varía entre	290$[mm]$ a 910$[mm]$
Z varía entre	70$[mm]$ a 275$[mm]$

6.1.2 Tipo de abrazadera y alineación

Uno de los aspectos más importantes dentro del diseño de un densímetro es el tipo de sujeción al tubo minero. Generalmente el tipo de abrazadera usado por la mayoría de las marcas, consta de un tipo de sujeción de dos placas de un espesor grueso que están sujetas por espárragos, fijados por pernos y asegurados por golillas de seguridad. Como se muestra en las **figuras 6.1** y **6.3**, el área de contacto generalmente es generada por planchas anguladas en forma de "V", soldadas a la plancha sostenedora, que distribuyen la carga a lo largo de su superficie del tubo minero, o por algún perfil doblado en algunas secciones que generan cargas puntuales sobre el tubo minero(**figura 6.4**).

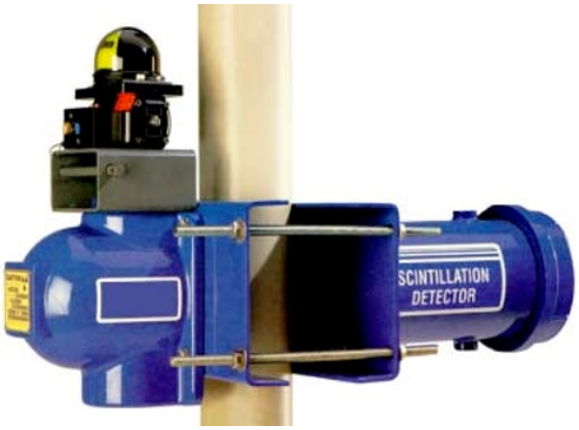


Figura 6.4: Abrazadera densímetro ABLE.

La configuración de alineación del contenedor de la fuente radiactiva y su respectivo detector, es dependiente del diámetro de la tubería y de la longitud de la medición. Estos dos parámetros determinan el volumen de medición que tienen directa relación a la cantidad de la cantidad de eventos producidos que sean necesarios para obtener una medición de densidad efectiva. Dependiendo del ángulo de la alineación, la longitud de medición aumenta con el largo del camino recorrido de la radiación a través del flujo de material. Ya sea una alineación perpendicular en 90°(**figura 6.5(1)**), o una alineación diagonal en 30°(**figura 6.5(2)**), o una alineanción colineal en 180°(**figura 6.5(3)**). Por lo tanto, una alineación de fuente radiactiva en diagonal o colineal incrementa el volumen de medición para tuberías de diámetro pequeño.

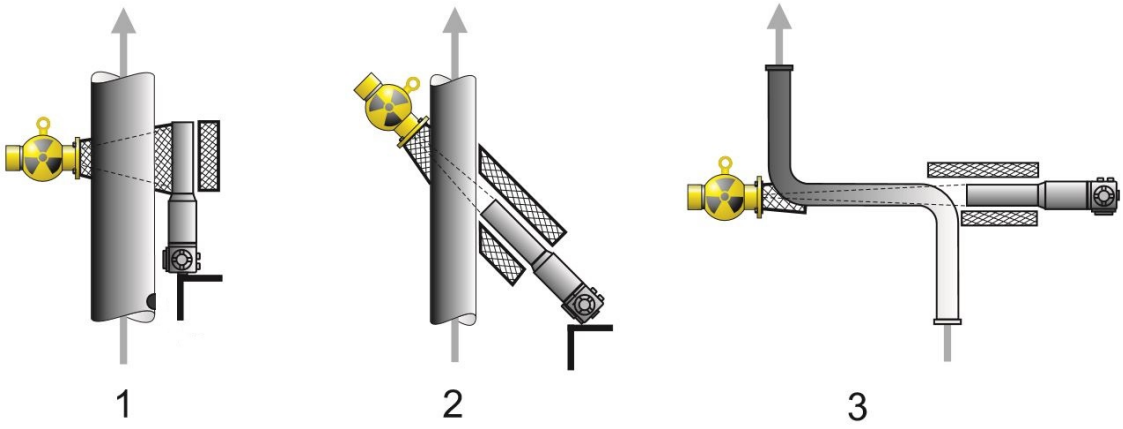


Figura 6.5: Tipos de alineación en montaje de abrazaderas.

6.2 Arquitectura de Densímetro con Etiquetador

En la siguiente **figura 6.6** se muestra una vista explosionada general que separa al modelo en tres secciones principales: El cuerpo o abrazaderas (1), el etiquetador (2) y el detector gamma (3). Debido al alto peso del etiquetador, el montaje de este conjunto empieza por el cuerpo que está compuesto de las abrazaderas que soportan la estructura. Una vez hecha la alineación,la cual se explicará en el siguiente punto, se procede al montaje del etiquetador y el detector gamma.

Lista de requerimientos para diseño con etiquetador

- La fuente radiactiva y el detector gamma deben ser fácilmente intercambiables.
- Ambos cristales centelleadores deben estar recubiertos de una pared de plomo de al menos $20[mm]$.
- Utilizar un isótopo radiactivo de **Na-22**, el cual requiere una protección de pared de plomo de al menos $100[mm]$.
- La alineación del sistema de anclaje por abrazadera debe ser colineal o en $180°$.

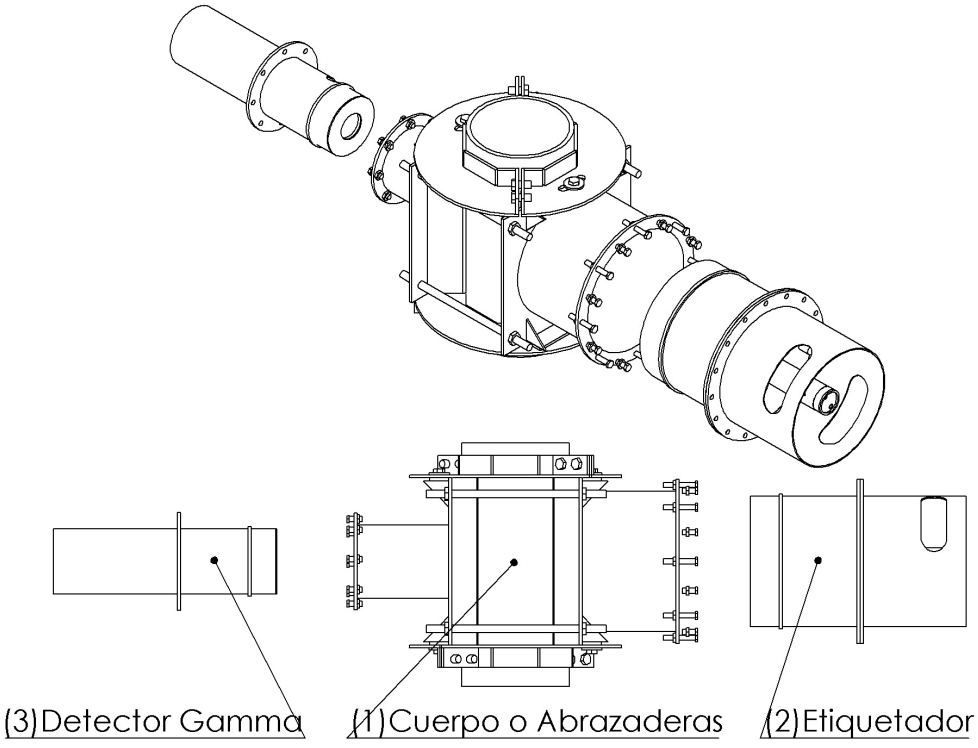


Figura 6.6: Vista explosionada general de Densímetro con Etiquetador.

6.2.1 Arquitectura de cuerpo o abrazaderas

El montaje del cuerpo del densímetro (**figura 6.8**) empieza por posicionar las "abrazaderas tope del eje Y"**(2)**. Una vez presentadas, se procede a montar el "soporte del etiquetador"**(4)** y el "soporte del detector gamma"**(3)**. En este punto se puede hacer la alineación colineal utilizando los esparragos para que no existan errores en la medición, generalmente se requiere un rango de error de $0{,}5[mm]$. Esto se consigue midiendo las distancias entre los extremos de las dos planchas soportantes que componen**(6)**.

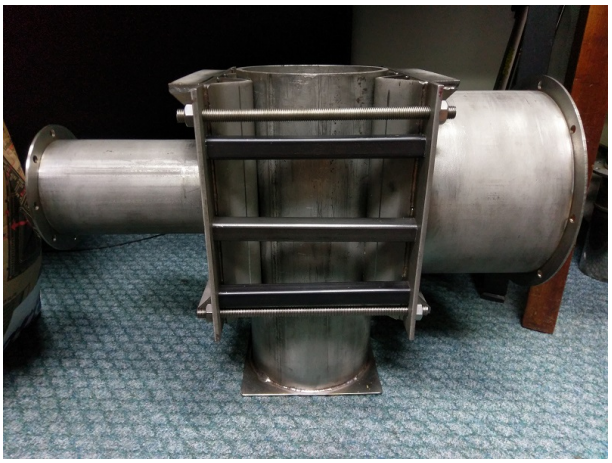


Figura 6.7: Vista real de abrazaderas.

Como aún no se monta ni el etiquetador, ni el detector gamma, se trabajará con solo el peso propio de la estructura, que alcanza los $26[kg]$, lo que mejora perceptiblemente la maniobrabilidad. Como la superficie del tubo minero debe ser perfectamente redonda se conseguirá una alineación bidimensional fácil y eficiente.

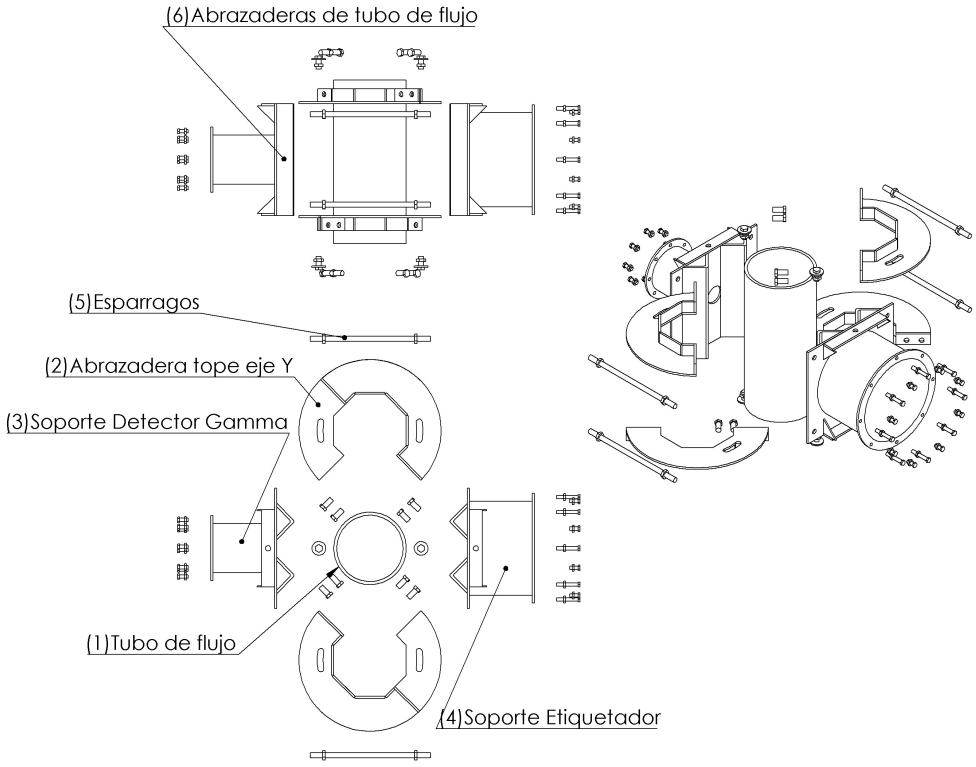
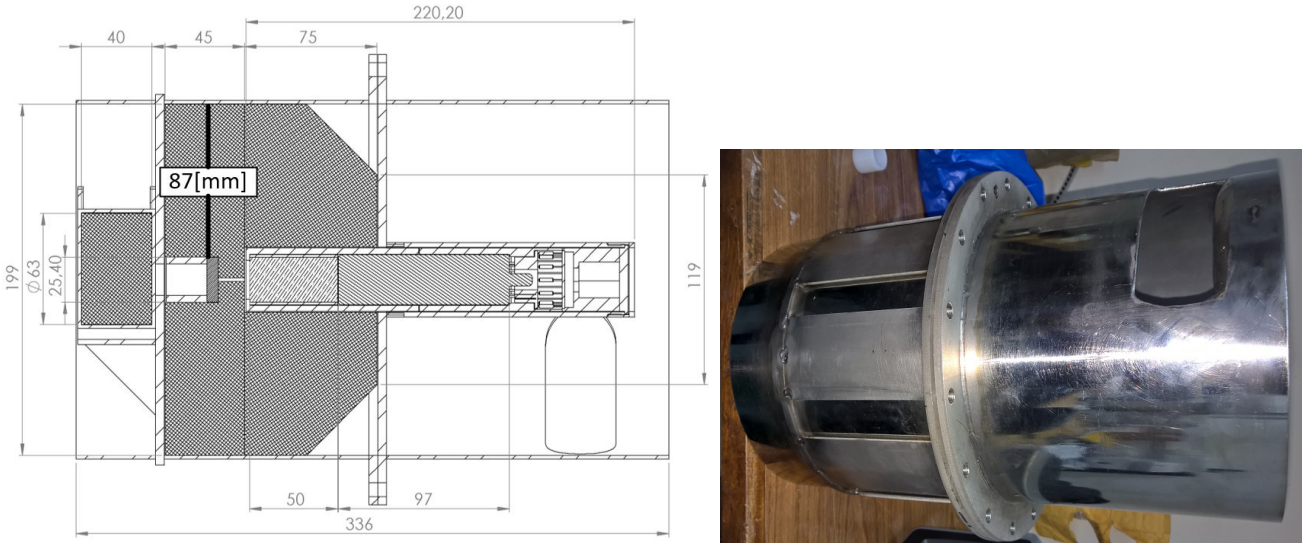


Figura 6.8: Vista explosionada Cuerpo central o Abrazaderas.

6.2.2 Arquitectura de etiquetador

Para el diseño del etiquetador se solicitó, por motivos de seguridad, que el espesor de pared de los colimadores(**figura 6.10(1)** y **(2)**) que contienen al isotopo, deben tener un espesor de pared cercano a los $100[mm]$, que en este caso es $87[mm]$(**figura 7.13b**). Mas adelante se demostrará que esta medida es exagerada por sobre lo recomendado y también es la razón del porque el etiquetador alcanza el peso total de $47[kg]$. El gatillo u obturador (**figura 6.10(16)**) del etiquetador es un disco grueso de plomo que gira mediante una barra excéntrica al centro de los colimadores. El detector gamma interno del etiquetador es removible e intercambiable (**figura 6.10(7,8,9,10,11,12,13,14)**).



(a) Vista corte de etiquetador

(b) Vista real etiquetador

Figura 6.9: Vistas diseño de etiquetador.

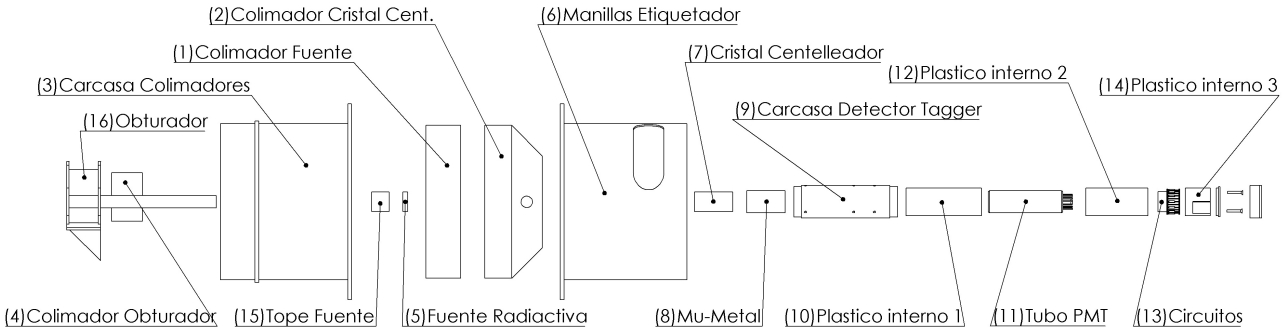
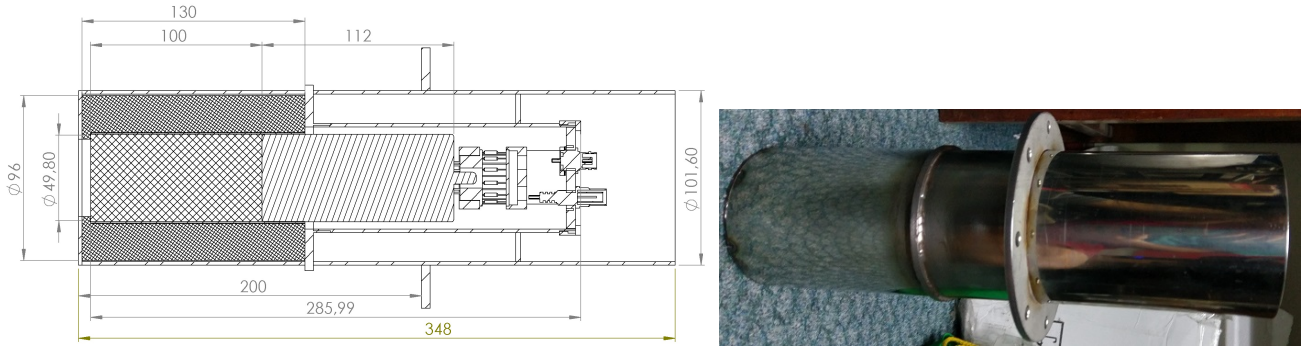


Figura 6.10: Vista explosionada de etiquetador.

6.2.3 Arquitectura de detector gamma

El detector gamma externo se coloca en el lado opuesto del tubo, donde fluye el concentrado de cobre, respecto al etiquetador. Como se puede ver en la **figura 6.12**. Este detector cuenta con un cristal centelleador**(5)** y un tubo fotomultiplicador**(6)**, ambos de gran diámetro (cercano a los $57[mm]$), que prácticamente doblan en volumen a los componentes usados en el detector interno del etiquetador. Esto es debido a que se necesita aumentar el ángulo sólido(esto se explicará un poco mas adelante), para mejorar la recepción de rayos gamma que vienen desde el lado opuesto del tubo de concentrado. Este detector gamma utiliza una pared de plomo**(2)** para proteger al cristal centelleador de rayos gamma extranjeros y su peso total alcanza los $10[kg]$.



(a) Vista corte de detector gamma.

(b) Vista real detector gamma.

Figura 6.11: Vistas diseño de detector gamma.

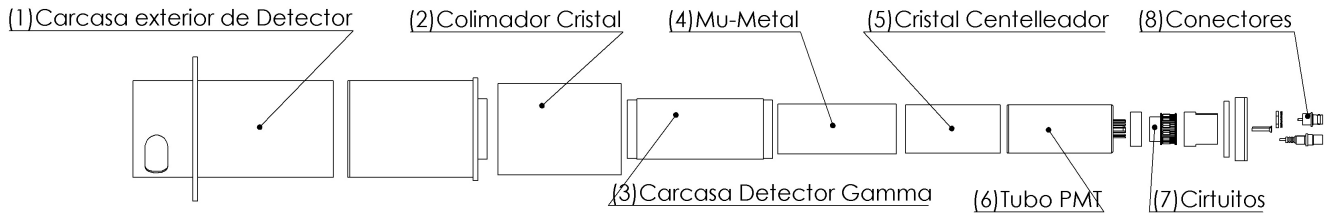


Figura 6.12: Vista explosionada de detector gamma.

6.3 Definición de componentes

En esta sección se dará una descripción detallada de cada uno de los componentes esenciales de un densímetro común junto con algunas alternativas. Mostrando por separado imágenes de cada uno de estos, explicando su funcionamiento especifico y su uso. Estos componentes son los mismos que serán utilizados en el densímetro con etiquetador y **Litodensitometro**, destacando la diferencia de la utilización de fuentes radiactivas de menor intensidad a diferencia de las alternativas comerciales comunes.

Primero se describirá que es una fuente radiactiva, sus alternativas y usos en la industria. Después se entregará una descripción detallada de como funciona un cristal centelleador, mas una básica descripción de alternativas. Posteriormente se explicará que es un tubo fotomultiplicador, mostrando fotos reales y otros modelos opcionales. El siguiente componente a describir será el Mu-Metal, explicando su utilidad en cuanto a protección magnética para los componentes electronicos de alta sensibilidad, y finalmente se describirá que es un colimador de plomo, y su uso como pared atenuadora de intensidad de rayos gamma.

6.3.1 Isótopo o Fuente Radioactiva

Se llama **Radioisótopo o Radionúcleo** a aquel isótopo que es radioactivo. Los átomos que son isótopos entre si, son los que poseen igual número atómico (o número de protones en el núcleo), pero diferente número másico (la suma de número de neutrones y de protones en el núcleo). Entonces los isótopos difieren entre sí por el número de neutrones.

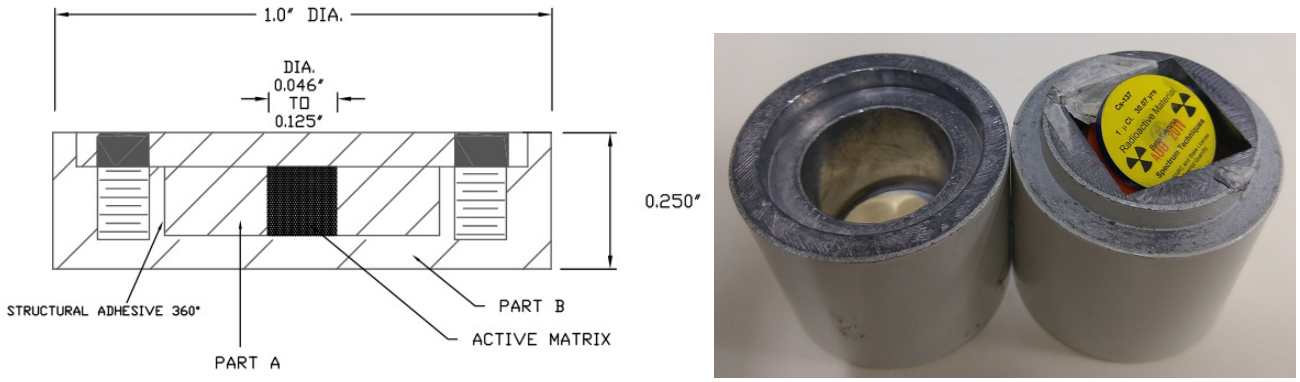
Utilizar una fuente radioactiva de distinto tipo e intensidad, hace variar la técnica de la densimetría nuclear. Esto sucede porque cada isótopo en particular emite partículas con cierta energía definida, y emiten radiación a una tasa por unidad de tiempo específica mientras estos se desintegran. Esta tasa es proporcional a la semivida del radioisótopo. Donde la semivida se define como el periodo de tiempo que debe transcurrir para que la actividad de una muestra caiga a la mitad. Por lo que se recomienda que los radionúcleos utilizados en industrias posean una semivida larga, para asegurar la longevidad de la fuente y su actividad.

Existen diversos usos de los Radioisótopos que miden diversos parámetros (**tabla 6.3**), ya sean:

Tabla 6.3: Distintos tipos de uso industrial para radioisótopos

Parámetro a medir	Fuente
Grosor de papel	Kr-83, Sr-90, Pm-157, TI-204
Grosor de lamina metálica	Am-141, Cs-137, Co-60
Densidad de líquido	Cs-137
Densidad de suelo	Cs-137
Densidad de flujo compuesto	Na-22, Co-60, Am-241, Cs-137
Humedad de suelo	Am-241/Be, Cf-252
Concentración de sedimento en suspensión	Cd-109, Am-241
Concentración de ceniza de carbón	Cs-137 + Am-241
Medidor de flujo multifase	Cs-137 + Am-241

Debido a su baja energía, la fuente mas importante que se utilizará en el diseño conceptual del **Litodensitometro** será la **Na-22** (**figura 6.13**), que también es usada en el densímetro con etiquetador. Esta fuente está recubierta de una resina epóxica de alto impacto que puede tener un color codificado para su identificación y su núcleo es un cilindro de $3[mm]$ de diámetro. La estructura contenedora de la fuente es de aluminio y la máxima actividad que esta puede presentar es de $0,22[mCi]$. Estas fuentes se pueden adquirir en Chile por la empresa CGM Nuclear S.A.



(a) Corte transversal de un Radioisótopo Na-22.

(b) Contenedor de plomo para transporte de fuente

Figura 6.13: Vista en detalle de una fuente radiactiva.

6.3.2 Cristal Centelleador

Un **Cristal Centelleador** (**figura 6.14**) es un material que centellea, es decir, exhibe luminiscencia cuando por el pasa radiación ionizante (electrones, positrones u otras partículas o iones más pesados). Esto sucede porque el material absorbe parte de la energía de la partícula incidente y la re-emite en forma de un corto destello de luz, típicamente en el rango visible. Si esta re-emisión es rápida, se le conoce como fenómeno de fluorescencia. De lo contrario, si la excitación es larga se le conocerá como fenómeno de fosforescencia.



(a) Vista frontal (b) Vista isométrica

Figura 6.14: Vistas de Cristal Centelleador

Los detectores de centelleo como el PMT o el MPPC, son los más utilizados en la industria para la medición de radiactividad. Estos perciben la interacción de la radiación gamma con la materia, ya sea efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares.

Cuando se liberan electrones sobre un material, este tiende a volver a su estado fundamental, lo cual produce fotones que generalmente se encuentran en el intervalo visible o ultravioleta de la luz. Sin embargo es importante mencionar que la transición de los electrones de vuelta a la banda de valencia estable, solo en cristales centelleadores, es lenta debido a su dopaje con impurezas las cuales crean estados intermedios de la energía antes de volver al estado de valencia. Debido a esto presentan gran poder de frenado de radiación gamma, además su eficiencia relativa al centellear (**tabla 6.4**) aumenta dependiendo de las dimensiones físicas del cristal.

Tabla 6.4: Ejemplos de cristales centelleadores y sus eficiencias a $662[keV]$

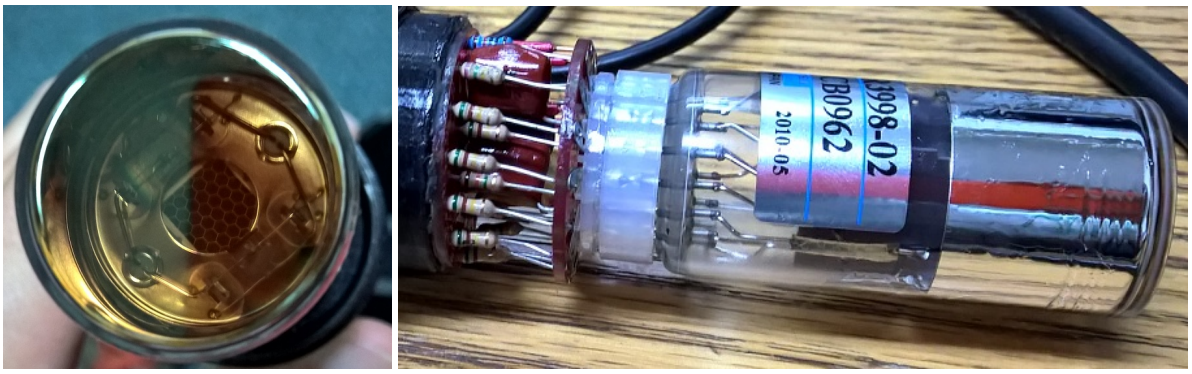
Nombre	Tipo	Efic. Relativa
Nal(Tl)	Cristal Inorg.	1,00
LaBr3(Ce)	Cristal Inorg.	1,00
Anthracene	Sol. Organico	0,43
Pilot B	Sol. Organico	0,30
NE 213	Liq. Organico	0,34
Csf	Cristal Inorg.	0,05

El tipo de cristal centelleador ubicado en el etiquetador es de **Bromuro de Lantano dopado con Cerio como activador(LaBr3(Ce))**, de diámetro $32[mm]$ y largo $50[mm]$. Mientras que el tipo de cristal centelleador del detector gamma es de **Yoduro de Sodio dopado con Talio(Nal(Tl))**, de diámetro $56,2[mm]$ y largo $100[mm]$. Estos cristales son eficientes a bajas energías de $511[keV]$. Ambos están encapsulados en una estructura de aluminio y pueden ser conseguidos en la empresa Epic Crystal Company Limited.

6.3.3 Tubo Fotomultiplicador

El tubo **fotomultiplicador** (**figura 6.15**) es un tipo de detector óptico de vacío que aprovecha el efecto de "emisión secundaria" de electrones para responder a niveles muy bajos de iluminación.

Está compuesto de un fotocátodo, que es una camara emisora de electrones producto de la entrada de fotones a esta, también llamados fotoelectrónes. Un campo electrónico acelera a estos electrones y los dirige hacia un Ánodo, que en estos tubos recibe el nombre de "Dínodo". El número de Dínodos y su disposición varía con el modelo de fotomultiplicador.



(a) Vista frontal (b) Vista lateral

Figura 6.15: Vistas de Tubo Fotomultiplicador

Cuando la luz entra al fotocátodo, esta convierte la energía de la luz incidente en fotoelectrones emitidos al vacío, seleccionando aquellos enfocados hacia los Dínodos donde son multiplicados en un proceso de emisión secundaria. Posteriormente la señal de salida se obtiene en el ánodo, donde la eficiencia de conversión o sensibilidad del cátodo varía con la longitud de la onda incidente, esta sensibilidad se llama "**Respuesta Espectral Característica**", y que en estos tubos resulta ser muy alta.

Tipos de fotomultiplicadores

- **Tipo frontal:** Tiene un fotocátodo semitransparente el cual es del tipo transmisor, que permite tener mejor uniformidad que el tipo lateral. La disposición frontal permite barrer áreas en un rango definido por el tamaño del tubo fotomultiplicador.
- **Tipo lateral:** Los fotomultiplicadores laterales emplean un fotocátodo del tipo reflector y una estructura de jaula circular para los Dínodos, lo que ofrece buena sensibilidad y amplificación con un voltaje de alimentación relativamente bajo. Usados generalmente en espectrofotometría y sistemas fotométricos en general, reciben la luz incidente por un lado del tubo de vidrio. Las ventajas son su bajo costo.
- **Otros tipos:** Se pueden hacer combinaciones de los dos fotomultiplicadores arriba mencionados para mejorar, por ejemplo, la recepción angular de luz, necesaria para experimentos de física de altas energías.

6.3.4 Mu-Metal

El **Mu-Metal** (**figura 6.16**) es una aleación de níquel-hierro compuesta de 75 % níquel, 15 % hierro, además de cobre y molibdeno. Este posee una permeabilidad magnética muy alta que hace al Mu-Metal muy eficaz en la detección de campos magnéticos estáticos o de baja frecuencia, que no puede ser atenuada por otros métodos. Debido a esto el nombre griego de la letra "mu"(μ), que representa la permeabilidad. Sobre las permeabilidades relativas, se pueden tener desde $80{,}000 - 100{,}000[miliDarcys]$ en comparación con los valores de $10{,}000 - 20{,}000[miliDarcys]$ de los aceros no aleados.

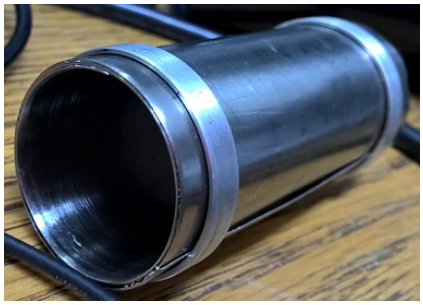


Figura 6.16: Mu-Metal enrollado para envolver al PMT.

La alta permeabilidad del Mu-Metal proporciona una ruta de baja resistencia para el **Flujo Magnético**, lo que lleva a su uso principal que es el **Escudo Magnético** contra **Campos Magnéticos estáticos** o que varían lentamente. Las zonas protegidas por el Mu-Metal, como electrónica de alta sensibilidad, establecen una ruta para las **Lineas de Campo Magnético** alrededor de la zona blindada.

Los objetos de Mu-Metal requieren un tratamiento térmico después de que adoptan su forma definitiva. Se aplica un recocido en un campo magnético, en atmósfera de hidrógeno, donde aumenta la permeabilidad magnética alrededor de 40 veces. El recocido altera la estructura cristalina del material, alineando los granos y eliminando algunas impurezas, especialmente de carbono, que restringen el movimiento libre de los **Dominios Magnéticos** que a la vez son los causantes de dar al material un ordenamiento magnético interno. De esta forma se mantiene el ordenamiento ferromagnético interno del metal para que este sea capaz de captar los campos magnéticos. Este fenómeno físico de captación de campos magnéticos no se da en metales austeníticos.

La flexión o la aplicación de golpes después del recocido, puede alterar la alineación de granos del material, dando lugar a una disminución de la permeabilidad de las zonas afectadas, que puede ser restaurada mediante la repetición de la etapa del recocido en atmósfera de hidrógeno. Es por esto que se debe manejar y plegar con cuidado.

6.3.5 Colimador

Un **Colimador** (**figura 6.17**) es un elemento que actúa como una muralla o pared para controlar las trayectorias, vectores o rayos que son emitidos en todas direcciones por una fuente radiactiva. El resultado es la generación de un caudal de partículas o conjunto de rayos con las mismas propiedades en un ángulo sólido controlado.

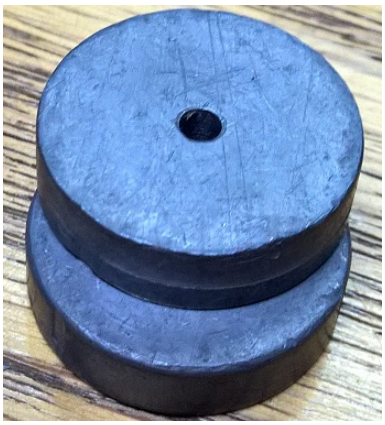


Figura 6.17: Colimador con apertura de $2mm$.

Los colimadores ópticos suelen estar formados fundamentalmente por un espejo parabólico, unas lentes y algunos diafragmas. En el caso de los colimadores para emisiones de partículas elementales cargadas se emplean campos eléctricos, magnéticos y diafragmas. Para el caso de partículas neutras se utilizan diafragmas para impedir el paso de partículas que se separan de la dirección elegida y algunos filtros absorbentes para eliminar ciertos rangos de energía.

Es común escuchar sobre el uso de plomo como pared de protección, su uso esta incluso estandarizado en maquinas radiológicas utilizadas en hospitales, a pesar de su alta toxicidad. Esto es por la facilidad de obtener este material y su relativamente alta densidad, pero existen otros materiales aun mas densos y por esto atenúan rayos gamma con mayor efectividad que el mismo plomo. En la siguiente **tabla 6.5** se mostrarán opciones de colimadores para densímetro nucleares:

Tabla 6.5: Ejemplos de colimadores utilizados en densímetros nucleares

Tipo de Colimador	Densidad $[g/cm^3]$
Epoxy mezclado	1-4
Acero Inox. 316	7,9
Plomo	11,4
Tungsteno	19,32
Oro	19,35

Finalmente un colimador es un instrumento de precision para que cada eje óptico de cada lente o espejo de un detector de partículas, coincida con el haz gamma de una fuente, mientras que el resto de las partículas emitidas en todas direcciones sean atenuadas o totalmente detenidas, ya sea para fines de seguridad del personal o control de intensidad para disminuir la dosimetría de exposición.

Capítulo 7

Diseño Detallado: Diseño mecánico conceptual Densímetro con Etiquetador

Una vez explicados los métodos de calculo para ángulo sólido y espesor de pared de atenuación. En esta sección se formalizará estos métodos mostrando los parámetros formalizados en las medidas finales que serán utilizadas en el densímetro con etiquetador. También se realizará un calculo de unión soldada para una zona critica que soporta la mayor parte del peso de los colimadores del etiquetador, y finalmente se mostrarán unos análisis de elementos finitos que analizan la integridad del tubo minero frente a la presión ejercida por las abrazaderas del densímetro.

Estos parámetros finales son importantes para el desarrollo del **Litodensitometro**, ya que este diseño será un agregado al mismo diseño del densímetro con etiquetador. estos resultados pueden conducir a un nuevo rediseño que mejore algún problema presentado mas adelante.

7.1 Ángulos sólidos del densímetro con etiquetador

Utilizando el método de calculo para ángulo sólido explicado en el **sección 4.2.7** , **ecuación 4.42**. Se calcularán dos ángulos sólidos provenientes de el nucleo(3[*mm*] diámetro) de la fuente radiactiva(**Na-22**), que se proyectan sobre las caras frontales de los dos cristales centelleadores. En la **figura 7.1**, se muestran los parametros necesarios para empezar a calcular los ángulos sólidos, teniendo en consideración la ubicación de la fuente **Na-22** ubicada a la derecha de la foto en color negro, más el diámetro y el largo de los cristales centelleadores. En los siguientes párrafos se explicará en profundidad que criterios, y como se calcularon estos ángulos sólidos.

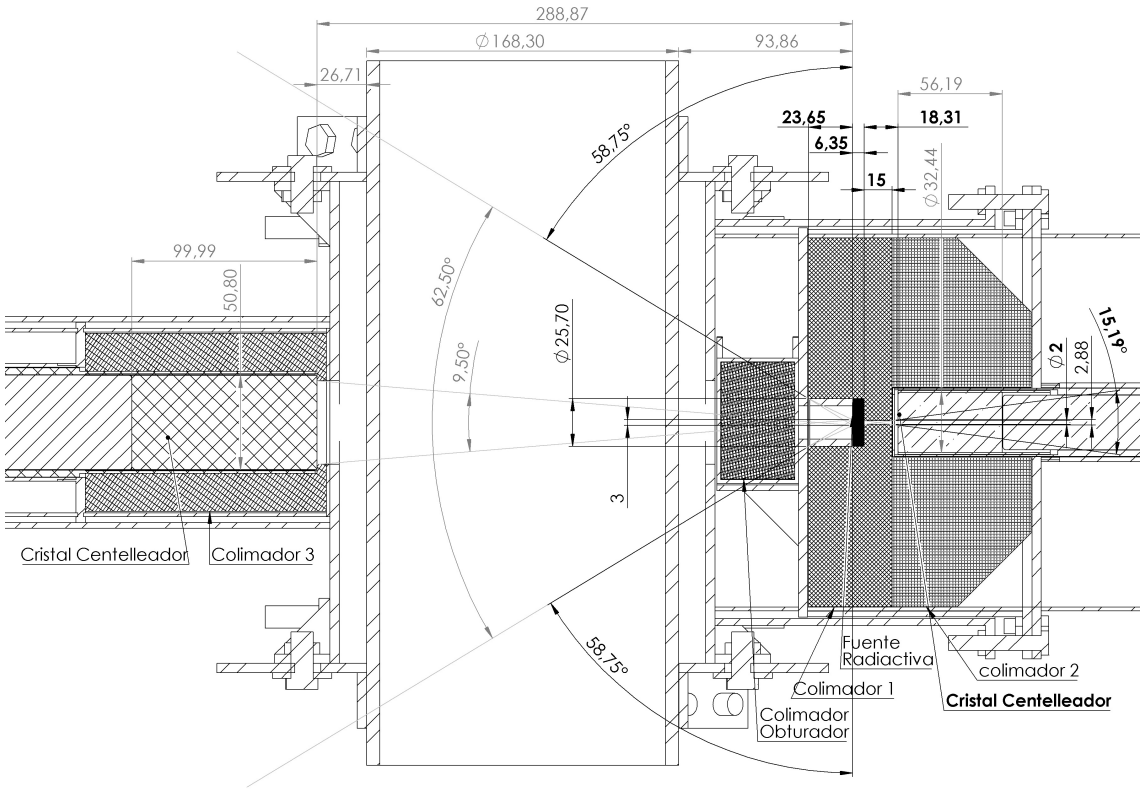
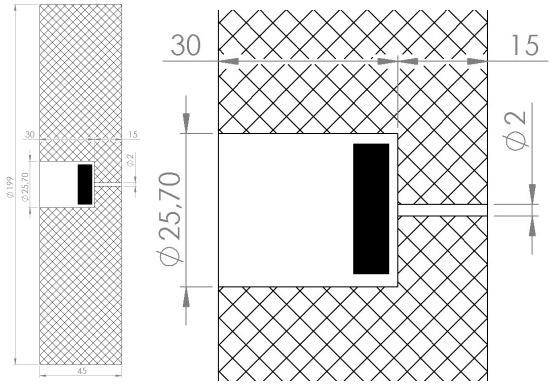


Figura 7.1: Ángulo sólido proyectado desde la fuente.

Empezando por la ubicación de la fuente de **Na-22**, esta está colocada dentro de un colimador cilíndrico llamado **"Colimador 1"** en la **figura 7.1**. Solamente enfocando al colimador que contiene la fuente, y haciendo un acercamiento a la cavidad donde esta va colocada(**figura 7.2**). Se puede ver que el agujero posee un diámetro de poco mas de una pulgada y una profundidad de 30[*mm*] por un lado, mientras que por el otro lado hay otro agujero de 2[*mm*] de diámetro y una profundidad de 15[*mm*].



(a) Colimador fuente (b) Acercamiento Colimador fuente

Figura 7.2: Vista en corte de Colimador contenedor de fuente radiactiva.

En la **figura 7.3** se muestran los máximos ángulos que se crean por los decaimientos positrón-gamma en dirección cruzada, que no son atenuados por las paredes de plomo. Siendo $62,5°$ el máximo ángulo de la cavidad izquierda, y $15,2°$ el máximo ángulo de la cavidad derecha. El conocimiento de estos ángulos será necesario para el desarrollo de los siguientes cálculos.

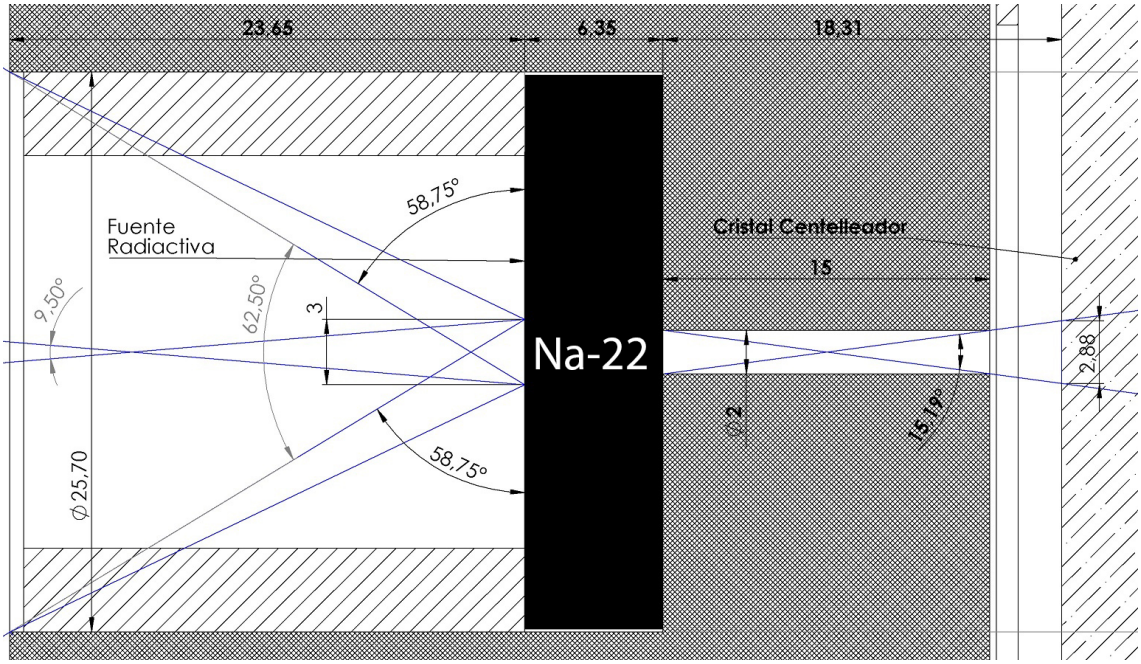


Figura 7.3: Máximos ángulos colimador etiquetador.

Ángulo Sólido Cristal Centelleador de Etiquetador

Para seleccionar el cristal centelleador que esta $18{,}3[mm]$ a la derecha de la fuente, en la **figura 7.4**, primero se tomó en consideración que los tubos fotomultiplicadores tienen tamaños predefinidos, y el diametro utilizado para este caso fue $29{,}5[mm]$. Los criterios para elegir este diametro de PMT, son el espesor de pared de plomo, longitud del cristal centelleador y apertura de colimador.

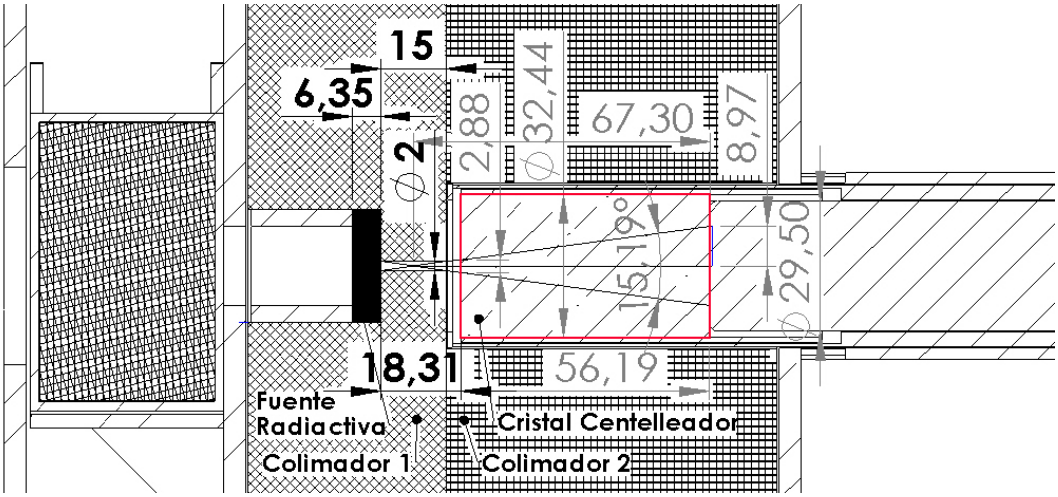


Figura 7.4: Exposición gamma a través de cristal centelleador derecho.

Teniendo en cuenta que los procesos nucleares son aleatorios, la apertura del colimador es de $2[mm]$. La elección de este diámetro fue hecha para limitar la cantidad de rayos gamma de tal forma que solo pase uno cada $200[ns]$(**figura 7.5**), que es un intervalo de tiempo(llamado "gate") que asegura que las maquinas lectoras de pulsos como el PMT, y luego un osciloscopio, o digitalizador de escritorio o una "Caen" puedan leer y procesar con estas señal antes que llegue la siguiente. De esta forma el PMT verá un pulso de luz en este intervalo de tiempo seleccionado, y la Caen podrá leer esta cantidad de pulsos sin saturarse.

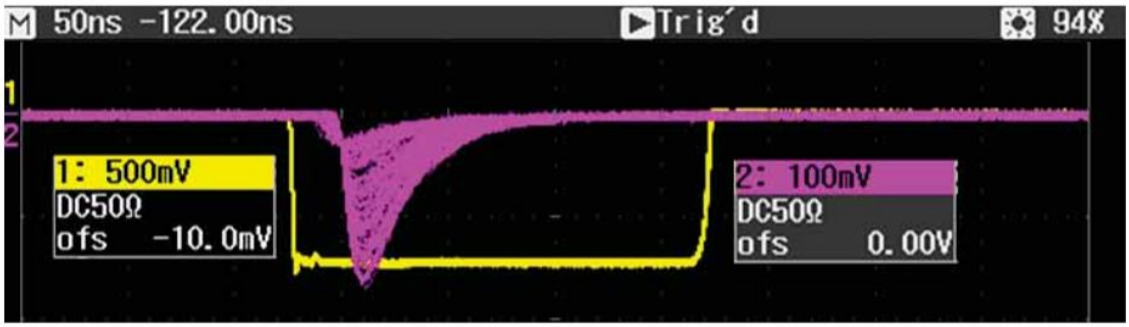


Figura 7.5: Un pulso cada 50 nano segundos.

Para el calculo de la eficiencia de utilización del cristal centelleador y el tubo PMT, se calculó que el ángulo sólido generado por la apertura del colimador de $2[mm]$ es $0,055[str]$. Mientras que el ángulo sólido midiendo la apertura con el diámetro completo del tubo fotomultiplicador es $0,146[str]$. Por lo tanto la eficiencia del ángulo sólido de la apertura de $2[mm]$ del colimador por sobre el ángulo sólido que abarca la superficie completa de la cara frontal del tubo foto multiplicador es de un 38 %. Este resultado muestra una falta de aprovechamiento de superficies, por motivos de eficiencia de lectura frente a la frecuencia de pulsos recibidos, por lo que se podría escoger un tubo foto multiplicador y un cristal centelleador más pequeño para disminuir costos.

En el calculo del largo del cristal centelleador, se utiliza un gráfico(**figura 7.6**) de eficiencia de absorción del cristal **Brillance 380(LaBr3(Ce))**. Este compara el porcentaje de absorción del cristal contra la energía de desintegración de la fuente **Na-22**($511[keV]$). Las lineas de eficiencia muestran los largos necesarios para conseguir el porcentaje de absorción deseado:

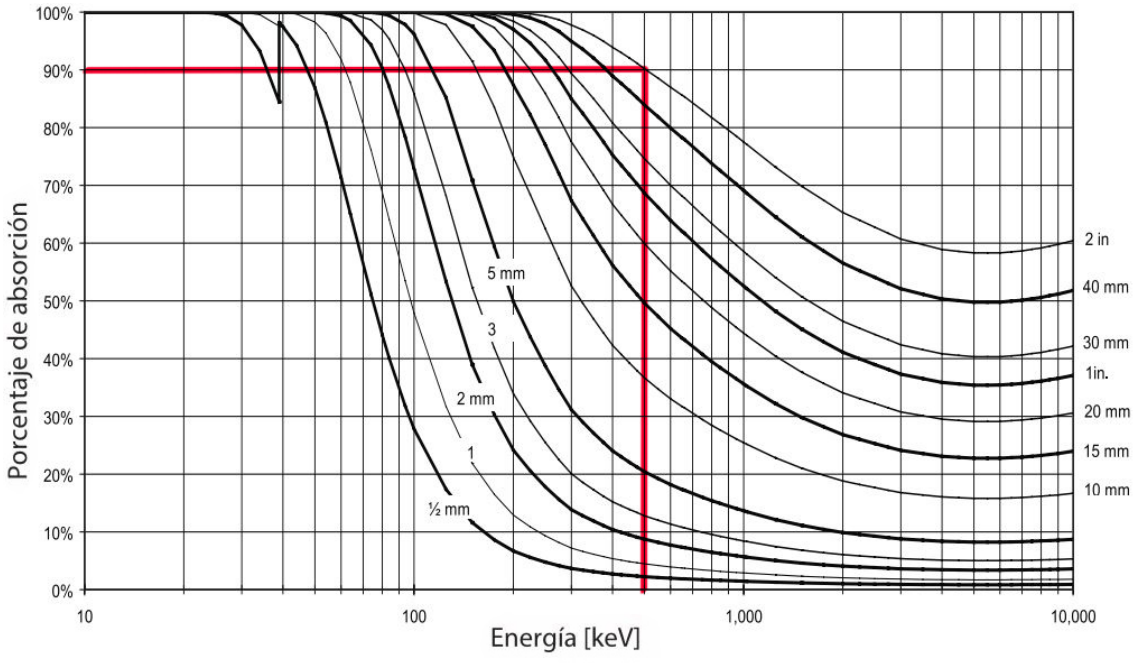


Figura 7.6: Gráfico para seleccionar largo de cristal centelleador LaBr3(Ce). [12]

Para el cristal centelleador utilizado en el etiquetador, debido a su largo de $67,3[mm]$, se puede esperar una eficiencia superior al 90 %. Finalizando el proceso de calculo de este cristal centelleador, se puede concluir que, debido a que este detiene en un 90 % la radiación de la fuente, el espesor de pared de plomo debe ser diseñado para cumplir un porcentaje similar o superior de eficiencia en cuanto a absorción de radiación. Este calculo se mostrará un poco mas adelante.

Ángulo Sólido Detector Gamma

En el calculo del ángulo sólido del detector gamma existe el problema de la distancia generada por el tubo de concentrado de cobre, por donde circula el concentrado de cobre que debe ser irradiado. Debido a la atenuación generada del haz gamma generada por el aire y las pareces de acero inoxidables, este factor debe tenerse en cuenta en el momento de calibrar la maquina para tomar mediciones confiables. La primera consideración que se hizo fue elegir el diámetro de tubería utilizado en minería que fuera lo mas pequeño posible(6[*pulgadas*]), la segunda fue de utilizar un solo material de acero que posea la misma densidad(acero inoxidable), la tercera es el espesor de pared del tubo minero(7[*mm*]), y finalmente la ultima consideración es la distancia agregada por el "Colimador Obturador", que protege al personal al momento de trasladar el etiquetador. La suma de estos elementos genera una distancia de 289[*mm*] entre la fuente de **Na-22** y el cristal centelleador de Nal(Tl), tal como se puede ver en la **figura 7.7**.

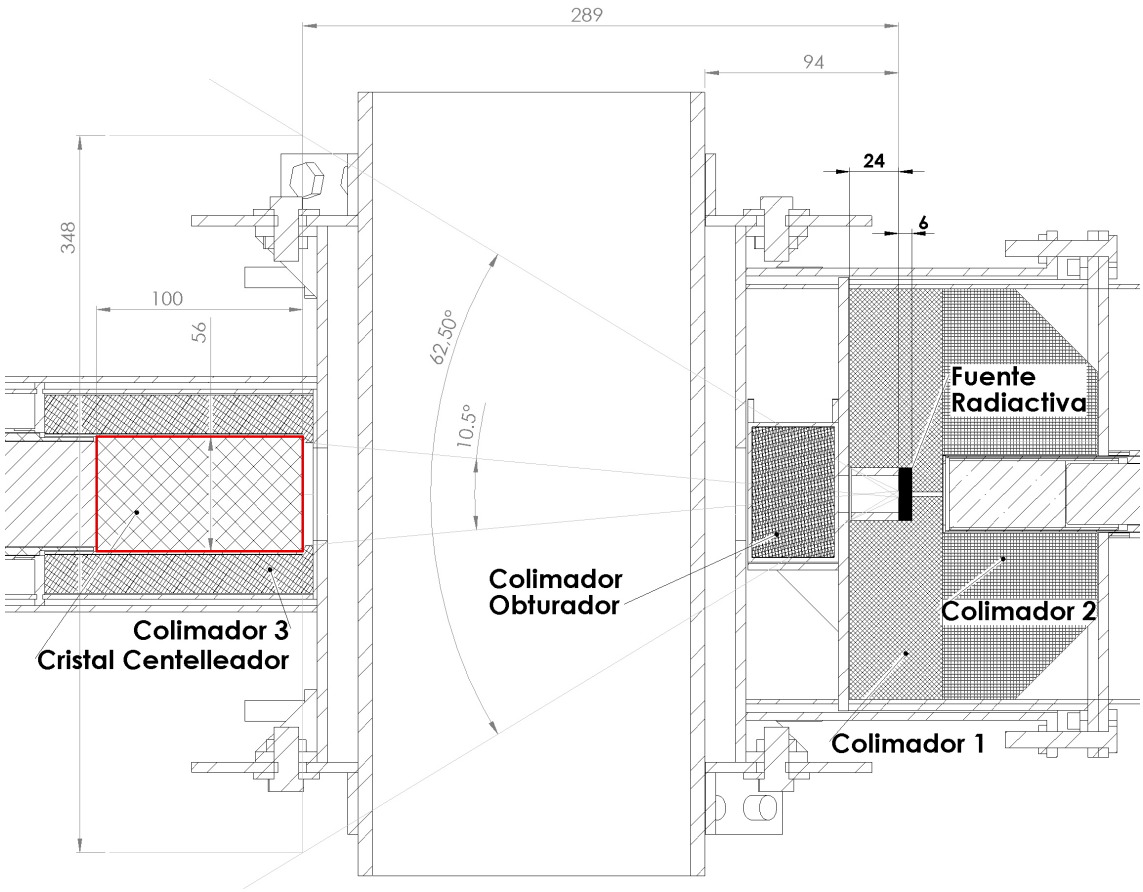


Figura 7.7: Exposición gamma a través de cristal centelleador izquierdo.

Una vez obtenida la distancia entre la fuente y el detector, se puede inferir que para un caso ideal se debe utilizar un cristal centelleador que abarque toda la apertura de la fuente radiactiva para aprovechar al ángulo sólido al máximo en cuanto a eventos o coincidencias puedan generarse en el cristal. Sin embargo se debe tener en consideración que no todas las paredes que atraviesa el haz gamma son homogéneas y que el tamaño del cristal centelleador ideal seria demasiado grande(348$[mm]$ de diámetro), y el costo seria muy alto(**figura 7.7**). Es por esto que se opto por utilizar un cristal centelleador de un diámetro mayor, a los 29,5$[mm]$ de diámetro, al utilizado en el etiquetador pero a la vez inferior al máximo ideal. Lo que resulta en la elección de un cristal centelleador de Nal(Tl)(menos costoso que el Labr3(Ce)) y con un diámetro de 56$[mm]$.

El ángulo sólido del diámetro ideal(384$[mm]$) es de 0,91$[str]$, mientras que el ángulo sólido del cristal de Nal(Tl) es de 0,026$[str]$, lo que muestra que la eficiencia del cristal Nal(Tl) es de 3 %.

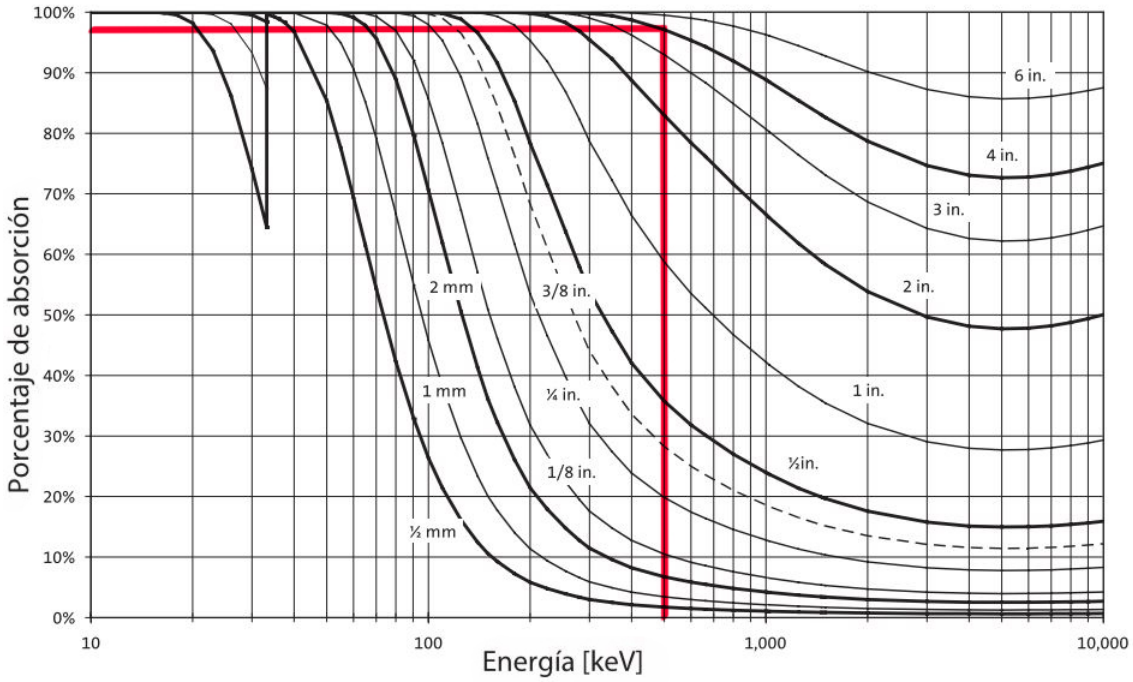


Figura 7.8: Gráfico para seleccionar largo de cristal centelleador Nal(Tl). [13]

Debido al bajo aprovechamiento del ángulo sólido, para el largo del cristal de Nal(Tl) se utilizó una medida de 100$[mm]$ para que este supere el 95 % de absorción de radiación(**figura 7.8**). De esta forma el detector maximizará su posibilidad de detectar al haz gamma atenuado en un ángulo pequeño.

7.2 Modelo de atenuación de plomo

Sabiendo la formula de atenuación de intensidad(**ecuación 4.18**) de rayos gamma sobre un material de espesor x, para medir densidad. En resumen, la intensidad de rayos gamma I_0 es atenuada hasta la intensidad I, con un coeficiente de atenuación "μ", en la siguiente ecuación:

$$I = I_0 e^{-x\mu} \tag{7.1}$$

En el siguiente paso se utilizará un gráfico de coeficiente de atenuación a través de plomo, que muestras sus zonas eficaces de la interacción energética, contra la energía utilizada por la fuente **Na-22** en la **figura 7.9**:

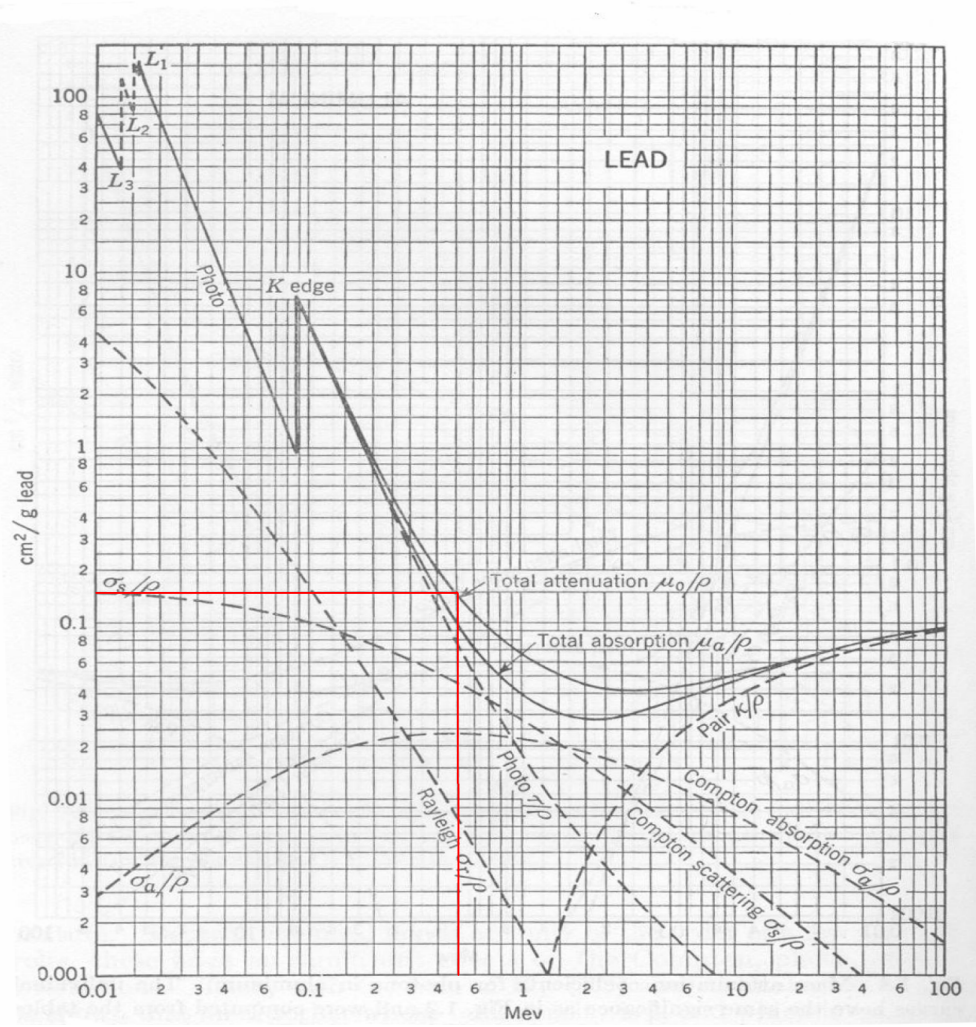


Figura 7.9: Gráfico de coeficiente de atenuación de plomo, imagen adaptada de [2].

Según la energía de la fuente **Na-22** que posee un decaimiento beta-menos de intensidad $511[KeV]$, esta situará un coeficiente de atenuación de $\mu_{Pb} = 0,15[\frac{cm^2}{g}]$. También se debe conocer que la densidad del plomo es $\rho_{Pb} = 11,34[\frac{g}{cm^3}]$.

Según la pagina web de **"Health Physics & Radiological Health"[11]**. Se obtendrá el valor de la constante específica de rayo gamma "Γ " del Sodio-22 a un metro de distancia, obteniendo lo siguiente:

$$\Gamma = 3,62 * 10^{-4} \left[\frac{mSv/h}{MBq}\right] \tag{7.2}$$

De acuerdo al área efectiva que se está usando en el factor Γ, la cual es una esfera de $4\pi r^2$ con radio de un metro. Se disminuye esta área a una distancia radial de $12,7[mm]$ que es el radio de la pastilla contenedora de la fuente de **Na-22**, siendo esta medida la máxima distancia que la radiación no es afectada por la pared de plomo, teniendo una actividad de:

$$\Gamma = 3,62 * 10^{-4} \left[\frac{mSv/h}{MBq}\right] * \left(\frac{4\pi * 1^2[m^2]}{4\pi * 0,1^2[m^2]}\right) \;\Rightarrow\; \Gamma = 2,24 \left[\frac{mSv/h}{MBq}\right] \tag{7.3}$$

Por simple regla de tres, se transforma el valor de desintegración atómica por segundo de la fuente de **Na-22** de $220[\mu Ci]$:

$$1[MBq] = 27[\mu Ci] \;\Rightarrow\; 8,14[MBq] = 220[\mu Ci] \tag{7.4}$$

Por lo tanto, la constante I_o de la **ecuación 7.1** quedaría cómo:

$$I_0 = 2,24 \frac{mSv/h}{MBq} * 8,14[MBq] = 18,3[mSv/hr] \tag{7.5}$$

De acuerdo a la ley estipulada en Chile, por el ministerio de salud, **Decreto** $N°3$ **del 3 de Enero de** 1985, que establece las "**medidas de protección personal radiológicas y los límites de dosis radioactivas que pueden recibir las personas ocupacionalmente expuestas**", con el objeto de prevenir y evitar la sobrexposición a radiaciones ionizantes, el **limite de dosis anual** será de $50[mSv]$:

$$D_{anual} = 50[mSv/año] \;\Rightarrow\; D_{hr} = 5,7[\mu Sv/hr] \tag{7.6}$$

Volviendo a la **ecuación 7.1**, se muestra la dosis radiactiva atenuada por hora. Reemplazando los valores quedaría como:

$$I_{hr} = I_0 e^{-x\mu} \quad \Rightarrow \quad 5,7 * 10^{-3}[mSv/hr] = 18,3[mSv/hr] * e^{-0,15[\frac{cm^2}{g}] * 11,34[\frac{g}{cm^3}] * \alpha[cm]} \tag{7.7}$$

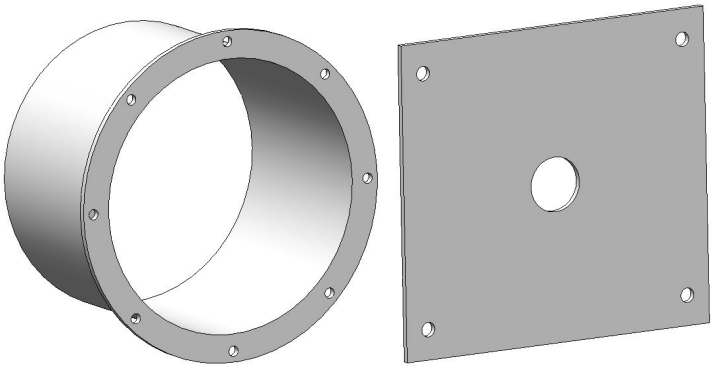
Despejando α:

$$\alpha = \ln\left(\frac{5,7 * 10^{-3}[mSv/hr]}{18,3[mSv/hr]}\right) / \left(-0,15[\frac{cm^2}{g}] * 11,34[\frac{g}{cm^3}]\right) = 4,75[cm] \tag{7.8}$$

El espesor de pared necesario para conseguir atenuar la fuente de **Na-22** con actividad de $220[\mu Ci]$, a una dosis anual permitida en Chile es de $5[cm]$ de plomo puro.

7.3 Estudio soldadura en etiquetador

Anteriormente se ha mencionado que la existencia de gruesas paredes de plomo para atenuar la radiación gamma a niveles no peligrosos para la salud humana. Esto se traduce en pesadas masas que generan cargas en la estructura del diseño del densímetro con etiquetador, y es por esto que se ha tomado en consideración la unión más vulnerable en toda la estructura. Observando la **figura 7.10**, la sección mayormente afectada a la carga generada por el plomo corresponde al cordón de soldadura que unirá al **"Tubo plancha soportante(a)"** con la **"Plancha rectangular(b)"**.



(a) Tubo plancha soportante (b) Plancha rectangular

Figura 7.10: Despiece de plancha soportante.

Quitando el peso del acero inoxidable($11{,}6[Kg]$) que necesita la estructura para sustentarse, el peso del plomo del etiquetador es de $35[Kg]$(**figura 7.11**), lo que es suficiente para ser transportado por dos personas. Esto significa una carga estática importante($343[N]$) para la unión soldada que sostendrá a esta pieza, siendo esta la unión que más peso tendrá que sostener en todo el diseño del densímetro. Por lo anteriormente mencionado, será necesario analizar las características de esta soldadura para ejecutar tal tarea.

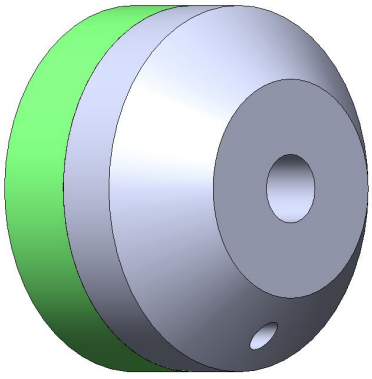


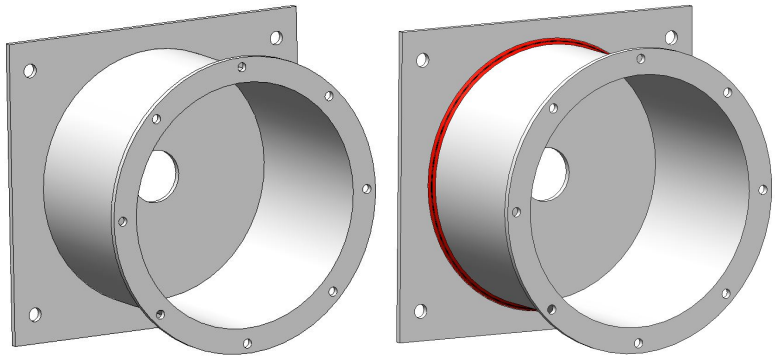
Figura 7.11: Colimadores de etiquetador.

De acuerdo a la metodología de medición de resistencia de soldadura entregada por el libro "Diseño en ingeniería mecánica de Shigley"[4]. Se abordarán consideraciones como la soldadura utilizada en la unión será de arco y se pueden considerar soldaduras tipo TIG o MIG. Debido a que este proceso produce el tamaño de garganta de la soldadura adecuado para la aplicación.

7.3.1 Ubicación de la soldadura

En esta sección se verá el tipo de geometría de los elementos a unir, el primero es un cilindro hueco que será unido a el segundo elemento que es una placa rectangular (**figura 7.12a**).

La unión de estos dos elementos se convertirá en la interfaz que sostendrá al etiquetador, es por esto que la unión de la plancha mas el cilindro será llamada "**Plancha o placa sostenedora**". La soldadura utilizada para este tipo de unión solo permite un tipo de cordón que es el de "Filete", en la **figura 7.12b** esta representada en color rojo.



(a) Plancha soportante de Etiquetador.

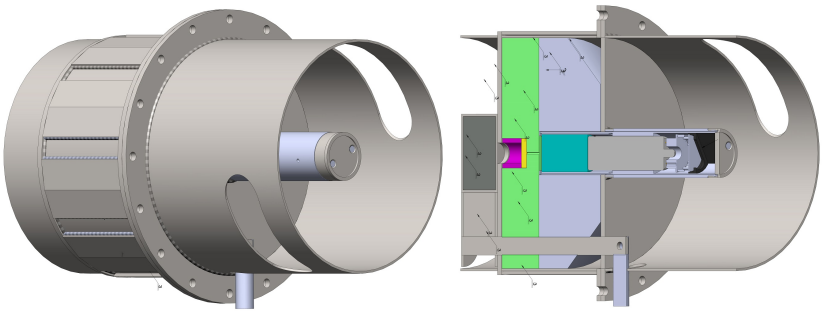
(b) Soldadura en rojo de plancha soportante.

Figura 7.12: Ensamble de plancha soportante de Etiquetador.

7.3.2 Datos importantes al diseñar soldadura

Al momento de realizar una operación de soldado, se tienen que considerar diversos factores de diseño, propuestos por el libro de **Shigley**[4]. Considerando que se realizo un correcto proceso de soldado y por esto el ambiente minero no contaminará al cordón de soldadura, no se utilizará "Refuerzo de soldadura". Tampoco se considerará peligroso que la unión reciba cargas externas ya sean constantes o periódicas. Estas consideraciones son hechas para resistir esfuerzos de Tensión(o flexión) y Cortantes, que serán aplicadas por la carga estática constante del peso del Etiquetador.

Debido a que el cilindro del etiquetador se encuentra sostenido en voladizo, se necesitará calcular la distancia del centroide de todo el contenido del etiquetador (**figura 7.13**), contando los colimadores de plomo que son la principal fuente del peso. Además se identificarán los factores de resistencia del electrodo de soldadura elegido para este trabajo y también para el acero inoxidable 316.



(a) Vista externa de etiquetador (b) Vista corte de etiquetador

Figura 7.13: Vista de detalle de etiquetador

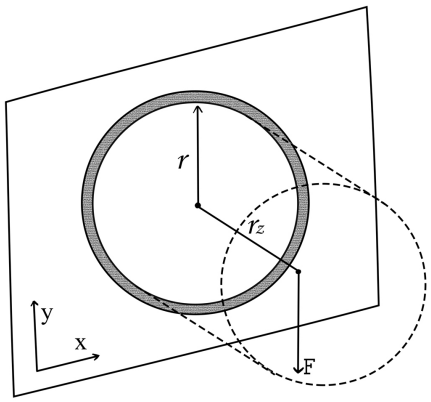


Figura 7.14: Vista de vector fuerza peso aplicada, y su centro de masa.

En la **figura 7.14** se puede tener una noción de la ubicación del centro de masa. Haciendo uso del software de Solidworks, se podrá tener la distancia "r_z" exacta que representa al centro de masa del etiquetador. En la **tabla 7.1** se pueden apreciar los valores necesarios para el calculo de la unión soldada.

Tabla 7.1: Valores de diseño para electrodo de soldadura en aceros austeniticos

Parámetro	Símbolo	Medidas
Masa total	m	46,6$[Kg]$
Diámetro exterior	D	203,2$[mm]$
Diámetro interior	d	199,2$[mm]$
Altura de cordón	h	$\geq 2[mm]$
Radio Soldadura	r	101,6$[mm]$
Dist. centro masa	r_z	56,6$[mm]$

Estudio de esfuerzos en material de cátodo de soldadura (**tabla 7.2**):

Tabla 7.2: Valores de diseño para electrodo de soldadura en aceros austenisticos [8]

Parámetro	Medidas
Tipo de electrodo	Electrodo AWS E-316-16
Limite esfuerzo fluencia	$400[Mpa]$
Limite esfuerzo tension	$612[Mpa]$
Elongación	41%

Estudio de esfuerzos en material de estructura soportante (**tabla 7.3**):

Tabla 7.3: Valores de diseño para estructuras de acero inoxidable [7]

Parámetro	Medidas
Tipo de acero	Acero inoxidable 316
Limite esfuerzo fluencia	$290[Mpa]$
Limite esfuerzo tension	$579[Mpa]$
Elongación	50%

Como ya se tiene una noción de la posición del centro de masa, y los valores límite de esfuerzos del material y electrodo que se usará. En la siguientes secciones se procederá a realizar el calculo de resistencia del cordón de soldadura.

7.3.3 Método convencional para metal de aporte(Calculo resistencia Soldadura)

Utilizando el método de calculo de soldadura del libro Shigley[4], se hará un calculo de resistencia de soldadura frente a la carga de flexión que es ejercida por la masa del etiquetador siendo sostenida en voladizo. Se realizará el calculo de los esfuerzos cortantes, utilizando una altura de cordón "h" igual a $2[mm]$ y se obtendrá un factor de seguridad respecto a la carga de flexión aplicada.

$$A = 1{,}414\pi hr = 1{,}414\pi * 2 * 101{,}65 = 903{,}102[mm^2] \tag{7.9}$$

$$I_u = \pi r^3 = \pi * 101{,}65^3 = 3{,}29968x10^6[mm^3] \tag{7.10}$$

$$I = 0{,}707hI_u = 0{,}707 * 2 * 3{,}29968x10^6 = 4{,}66575x10^6[mm^4] \tag{7.11}$$

$$\tau' = \frac{F}{A} = \frac{46{,}6 * 9{,}81}{903{,}102 * h} = 0{,}506195[MPa] \tag{7.12}$$

$$\tau'' = \frac{Mr}{I} = \frac{46{,}6 * 9{,}81 * 101{,}65 * 101{,}6}{4{,}66575x10^6} = 1{,}01189[MPa] \tag{7.13}$$

$$\tau = \sqrt{\tau'^2 + \tau''^2} = \sqrt{(0{,}506195)^2 + (1{,}01189)^2} = 1{,}13144[Mpa] \tag{7.14}$$

Para el calculo del factor de seguridad se utilizará un factor de "Esfuerzo permisible" de $0{,}6 * S_y$ que es utilizado para cargas de flexión en soldaduras de filete en el código AISC para metales de aporte. Entonces con base a la resistencia de fluencia de la soldadura AWS E 316L-16(**tabla 7.2**), cuyo valor es $400[Mpa](58{,}016[ksi])$, se obtiene un factor de seguridad:

$$F.S. = n = \frac{S_{sy}}{\tau} = \frac{0{,}6 * S_y}{\tau} = \frac{0{,}6 * 400}{1{,}13144} = 212{,}119[-] \tag{7.15}$$

El alto valor del factor de seguridad tiene mucho que ver con la relación entre la altura del cordón de soldadura y la carga aplicada por el peso del etiquetador. Esto significa que la carga estática ejercida es muy baja en comparación al cordón de soldadura utilizado. Por lo tanto la resistencia de este cordón esta sobredimensionada para esta tarea.

7.3.4 Calculo de altura de cordón para metal de aporte

En esta sección se realizará el mismo calculo del punto anterior, pero se se despejará y calculará la altura de la garganta "h" del cordón de soldadura. De esa forma se podrá tener una noción de la altura de cordón teórica necesaria para la carga aplicada, y se responderá porque se obtuvo un factor de seguridad tan alto en el punto anterior. La altura teórica de cordón será calculada con un factor de seguridad de 3:

$$A = 1{,}414\pi hr = 1{,}414\pi h * 101{,}65 = 451{,}551 * h[mm^2] \tag{7.16}$$

$$I_u = \pi r^3 = \pi * 101{,}65^3 = 3{,}29968x10^6[mm^3] \tag{7.17}$$

$$I = 0{,}707hI_u = 0{,}707 * h * 3{,}29968x10^6 = 2{,}33287x10^6 * h[mm^4] \tag{7.18}$$

$$\tau' = \frac{F}{A} = \frac{46{,}6 * 9{,}81}{451{,}551 * h} = \frac{1{,}01239}{h}[MPa] \tag{7.19}$$

$$\tau'' = \frac{Mr}{I} = \frac{46{,}6 * 9{,}81 * 56{,}6 * 101{,}6}{2{,}32943x10^6 * h} = \frac{2{,}02379}{h}[MPa] \tag{7.20}$$

$$\tau = \sqrt{\tau'^2 + \tau''^2} = \sqrt{\left(\frac{1{,}01239}{h}\right)^2 + \left(\frac{2{,}02379}{h}\right)^2} = \frac{2{,}26288}{h}[MPa] \tag{7.21}$$

Con base a la resistencia mínima de fluencia de la soldadura AWS E 316L-16, cuyo valor es $400[Mpa](58{,}016[ksi])$ y utilizando un factor de seguridad de tres, se obtiene un ancho de garganta:

$$F.S. = n = 3 \tag{7.22}$$

$$3 = \frac{0{,}6 * 400 * h}{2{,}26288} \quad \Rightarrow \quad h = 0{,}028286[mm] \approx 0{,}03[mm] \tag{7.23}$$

Dado que el ancho de la garganta obtenido esta muy por debajo de lo esperado, se puede entender el porque el factor de seguridad entregó un valor tan alto en el punto anterior que utilizó una altura de cordón de $2[mm]$(98,5 % más grande).

Dado que el mínimo diámetro de electrodo de soldadura de acero inoxidable (AWS E 316L-16) es $2{,}4[mm]$ según el manual Induras. Para alcanzar una altura de garganta de altura $0{,}02[mm]$ se deberá aplicar una deposición, o avance, del material rápida al momento de soldar. Es necesario destacar que al aumentar la velocidad de avance al soldar, es la mejor manera de cuidar la composición del acero inoxidable y así este no pierda sus propiedades debido a las altas temperaturas.

7.4 Estudio de abrazaderas del etiquetador

En esta sección se realizará un "**Análisis estático de abrazaderas**", estudiando el sistema de abrazaderas del densímetro con etiquetador que abraza al tubo minero que transporta concentrado de cobre, y de esta forma cuidar la integridad de este para evitar alcanzar un punto critico en la resistencia de fluencia.

Para empezar este estudio se realizará un análisis estático de fuerzas con el que se evaluará la aplicación de todas las cargas estáticas aplicadas que son derivadas al sistema de abrazaderas que aprietan al tubo minero. De esta forma se podrá anticipar el comportamiento de la deformación del tubo minero. Posteriormente se realizará otro estudio que analizará en profundidad la distribución de las cargas de apriete hechas por las abrazaderas sobre el tubo minero, con un programa de elementos finito.

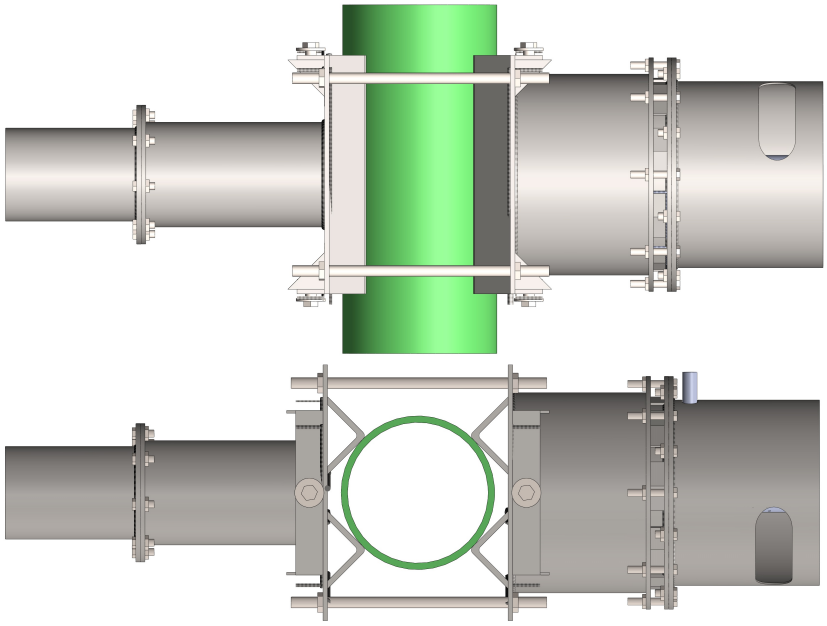


Figura 7.15: Vistas completas de densímetro con etiquetador.

7.4.1 Análisis estático de fuerzas

Para este análisis se debe entender como se proyectan las cargas ejercidas por los espárragos ubicados en las planchas que sujetan al etiquetador y al detector gamma. Estas cargas se concentran en las placas dobladas, llamadas perfiles ”V”, exactamente en las puntas de estas. El problema de estas es que concentran las cargas en áreas de apoyo muy pequeñas, lo que genera excesivas concentraciones de esfuerzos que pueden exceder la resistencia elástica del tubo de acero.

En la siguiente **figura 7.16**, se presenta una vista de corte superior del densímetro y su diagrama de cuerpo libre. Como se proyectan las fuerzas normales de los espárragos sobre el tubo y las fuerzas de roce aplicadas en los cuatro apoyos de las abrazaderas.

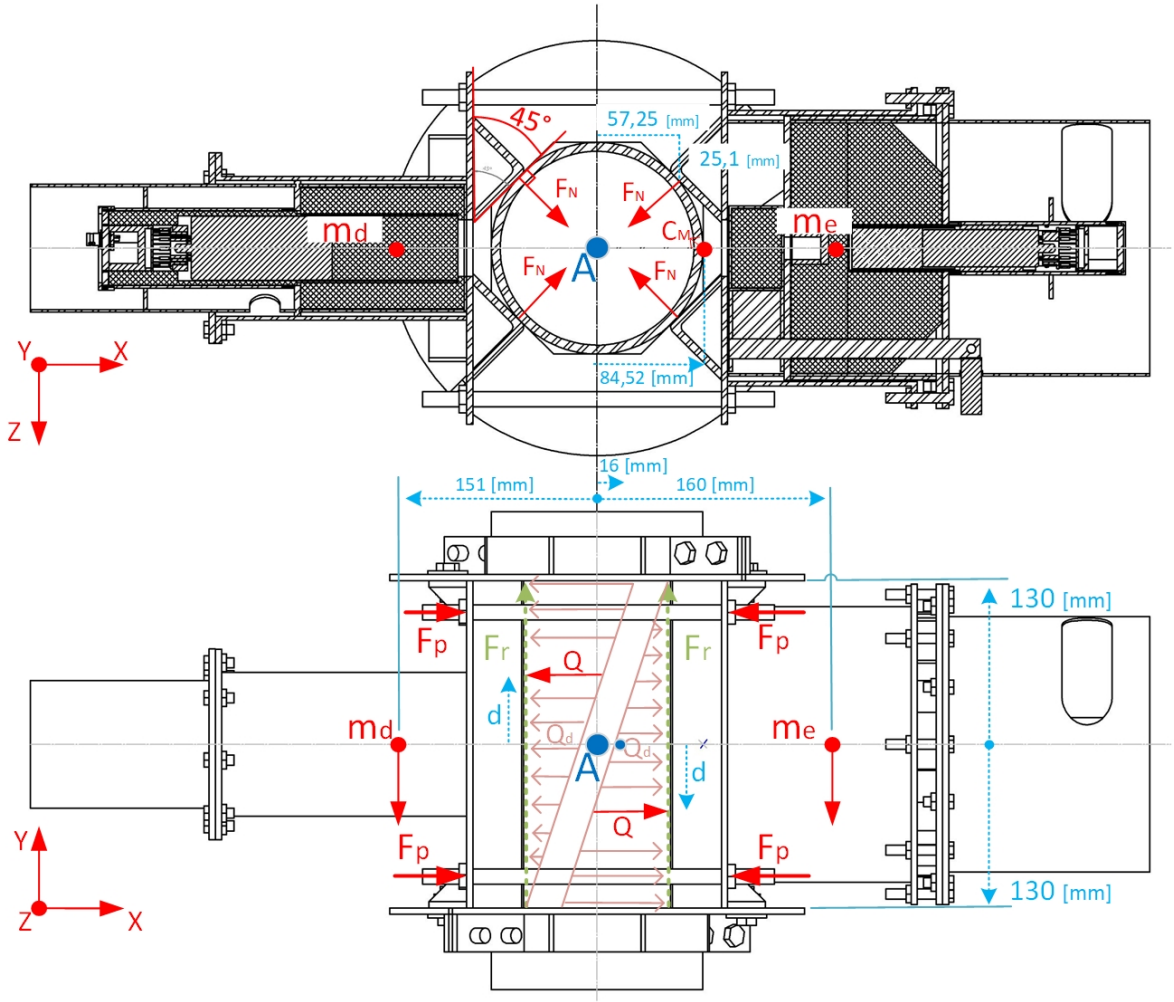


Figura 7.16: DCL densímetro con etiquetador.

Se debe tener en cuenta que existe un desbalance entre los pesos del etiquetador (m_e) y el detector (m_d), ya que el peso del primero es de $46,6[kg]$ y el del segundo es de $10,8[kg]$. Además de considerar la masa de la estructura de acero inoxidable $26[kg]$ y su centro de masa ubicado a $16[mm]$ desde el centro A hacia el etiquetador. El centro de masa de la estructura total del densímetro será desplazado $84,52[mm]$ hacia el etiquetador. Esto genera una diferencia de momentos sobre las abrazaderas que se apoyan en el tubo minero, que a la vez es traducida en una distribución de esfuerzos no uniforme que idealmente se representa como una distribución lineal de fuerzas "Q_d". El centro de masa estará posicionado cerca de la cara extrema del tubo de concentrado minero.

Tiendo en cuenta esto ultimo, la sumatoria de fuerzas en eje X:

$$\sum F_x = 0: \tag{7.24}$$

$$4F_p - 4F_p + 2Q_{px} - 2Q_{px} = 0 \tag{7.25}$$

Sumatoria de fuerzas en eje Y:

$$\sum F_y = 0: \tag{7.26}$$

$$4f_r - (m_e + m_d + m_a) * 9,81 = 0 \tag{7.27}$$

$$4f_r - (10,8 + 46,6 + 26) * 9,81 = 0 \tag{7.28}$$

$$f_r = 204,5[N] \tag{7.29}$$

Sabiendo que el coeficiente de roce entre aceros es 0,74, gracias a una fuente web[16]:

$$f_r = \mu Q[N] \tag{7.30}$$

Se puede obtener el valor especifico que representa a la concentración Q, de fuerzas de la distribución de esfuerzos lineal Q_d:

$$Q = \frac{204,5}{0,74}[N] \tag{7.31}$$

$$Q = 276,4[N] \tag{7.32}$$

Sumatoria de momentos en A, se obtendrá la distancia real “d”:

$$\sum M_A = 0: \tag{7.33}$$

$$4dQ_{px} + 0,151 * m_d * 9,81 - 0,16 * m_e * 9,81 - 0,016 * m_a * 9,81 = 0 \tag{7.34}$$

$$4 * d * 276,4 + 0,151 * 10,8 * 9,81 - 0,16 * 46,6 * 9,81 - 0,016 * 26 * 9,81 = 0 \tag{7.35}$$

$$d = 0,055[m] = 55[mm] \tag{7.36}$$

Este resultado es bastante distinto al supuesto de tener una concentración de esfuerzos lineal, ya que el centro de gravedad de un triangulo rectángulo de cateto $260[mm]$ debería ser:

$$d_{centro\ geometrico} = \frac{2}{3} * 260 = 86,6[mm] \tag{7.37}$$

Por lo tanto la concentración de esfuerzos no es necesariamente uniforme ya que la distancia “d” es un 36% menor a la esperada. Esto se podrá comprobar mas adelante en el análisis de elemento finito.

La fuerza teórica calculada en la **ecuación 7.32**, idealmente tiene el mismo sentido y opuesta dirección de aplicación por los pernos métricos M10 que apretarán a las abrazaderas, esta fuerza equivale a la fuerza mínima para sostener al densímetro con etiquetador. Para calcular la máxima fuerza soportada por el esfuerzo de fluencia del acero 316L, se utiliza el “Área de Esfuerzo de Tensión” para una tuerca de diámetro M10, véase la (**figura 7.17**):

Diámetro mayor nominal d, mm	Serie de paso grueso			Serie de paso fino		
	Paso p, mm	Área de esfuerzo de tensión A_t, mm²	Área del diámetro menor A_r, mm²	Paso p, mm	Área de esfuerzo de tensión A_t, mm²	Área del diámetro menor A_r, mm²
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0

Figura 7.17: Tabla de áreas de esfuerzo y diámetro, adaptado de libro Shigley. [4]

El factor de seguridad teórico de trabajo aplicado sobre las áreas de esfuerzo de tensión que los pernos aplican sobre las planchas de apoyo de acero 316L con esfuerzo de fluencia de 290$[Mpa]$:

$$FS = \frac{58[mm^2] * 290[Mpa]}{276{,}4[N]} = \frac{9860}{276{,}4} = 35{,}7[-] \tag{7.38}$$

El factor de seguridad obtenido en la **ecuación 7.38** es excesivamente alto. Por lo tanto la fuerza utilizada sobre las áreas de esfuerzos de tension, que genera la fuerza mínima para que toda la estructura del densímetro con etiquetador no deslice a través del tubo minero, esta muy por debajo a la máxima recomendada. Esto significa que las cargas aplicadas por las abrazaderas están muy por debajo, y no debería representan riesgo alguno pensar en utilizar una mayor carga para asegurar la estabilidad del agarre. Sin embargo es necesario tener en cuenta que puede haber una concentración de esfuerzos a lo largo de la distribución de las cargas de las abrazaderas. Esta conclusión esta basada en que los pesos del etiquetador, en comparación al detector gamma son distintos, y pueden generar una diferencia de momentos que cambien esta distribución de cargas. Si se producen concentraciones de cargas en ciertas zonas, entonces puede existir deformación del tubo minero.

Por la razón anteriormente mencionada, en la siguiente sección se estudiarán estas distribuciones de cargas a lo largo del tubo minero, con la ayuda de un software de elemento finito.

7.5 Análisis Ansys

La razón de hacer un análisis de esfuerzos en Ansys, es para formalizar un análisis de fuerzas mas serio. Mostrando un comportamiento de esfuerzos de carácter realista frente al análisis de esfuerzos simple mostrado en el punto anterior.

Se realizará un estudio mediante elementos finitos para hacer un análisis mas profundo de la distribución de las cargas a lo largo del contacto entre las abrazaderas y el tubo minero. Primero se modificará el diseño base, el modelo de estudio para el densímetro con etiquetador será reducido a dos planchas de acero y el tubo de concentrado minero, tal como muestra el modelo básico de la **figura 7.18**. Esto se hace para reducir los tiempos de análisis en el programa de elementos finitos llamado "Ansys". Este modelo se exporta a un formato ".step" y se carga en el programa.

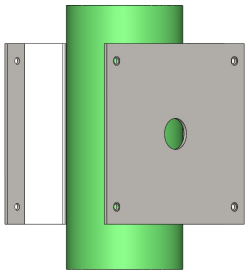


Figura 7.18: Modelo básico.

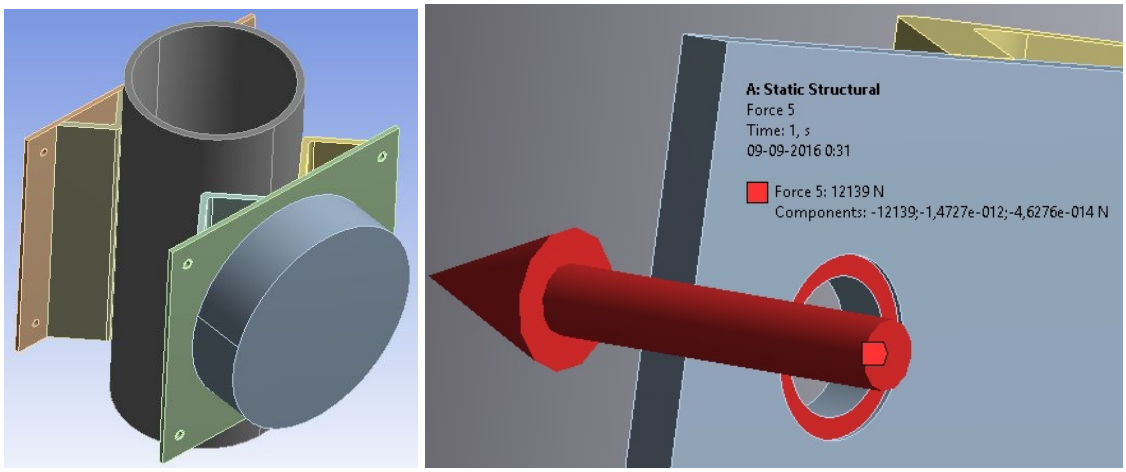
Una vez en el ambiente de Ansys, lo primero que hay que definir las características del acero inoxidable 316*L* [7], ya que este no existe dentro de la biblioteca de aceros del programa. Para que Ansys funcione correctamente se necesitan al menos cuatro valores clave: Densidad, módulo de Young, módulo de Poisson y Resistencia de fluencia (**figura 7.19**).

Properties of Outline Row 3: SS 316L

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7990	kg m^-3		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's...			
5	Young's Modulus	1,93E+11	Pa		
6	Poisson's Ratio	0,27			
7	Bulk Modulus	1,3986E+11	Pa		
8	Shear Modulus	7,5984E+10	Pa		
9	Field Variables				
10	Temperature	Yes			
11	Shear Angle	No			
12	Degradation Factor	No			
13	Tensile Yield Strength	2,9E+08	Pa		
14	Tensile Ultimate Strength	5,58E+08	Pa		

Figura 7.19: Caracterización acero 316L dentro de Ansys.

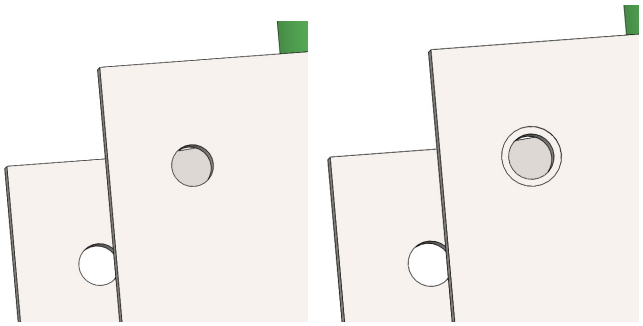
El siguiente paso, dentro de Ansys, es la importación del modelo ".step" y la asignación del material de acero 316L a todo el modelo. Posteriormente, se crean las fijaciones y esfuerzos aplicados en el modelo. Para este análisis de hará una fijación de superficies en la sección superior e inferior del tubo minero, tal como lo muestra la siguiente **figura 7.20a**.



(a) Fijación de caras (b) Definición fuerzas

Figura 7.20: Definición de esfuerzos en Ansys.

En este paso se realizarán iteraciones de la fuerza "F_p"(la misma de la **figura 7.16**) aplicada en el área de apoyo de la tuerca sobre la plancha de acero. Este esfuerzo corresponde a la carga de prueba que está caracterizada en la **figura 7.20b**, y tal como se explica en la **figura 7.21b**, el área de la carga será la misma que el "corte representativo" que posee la misma área de esfuerzo de tensión, realizando una pequeña extracción de material equivalente al "**Área de esfuerzo de tensión**", que se puede ver en la **figura 7.17**.



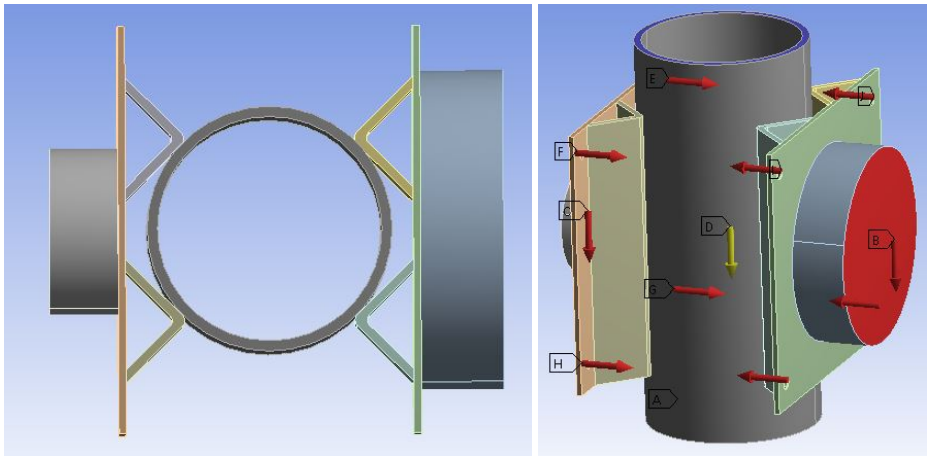
(a) Agujero sin corte (b) Corte representativo

Figura 7.21: Descripción gráfica de Área de esfuerzo de tensión.

7.5.1 Análisis de espárrago M10, ASTM A320

El espárrago escogido para este diseño es un ASTM A320 B8M clase 2 Acero Inoxidable. Posee una resistencia mínima de fluencia $655[Mpa](95[ksi])$ según el catalogo de Southern Fasteners and Supply [9].

Para este análisis en Ansys se utilizará la fuerza obtenida en la **ecuación 7.32**, el que será aplicada sobre el área de esfuerzo de tensión, tal como se explico en el corte representativo de la **figura 7.21b**. El modelo básico(**figura 7.22a**) para hacer este análisis tendrá dos pesos adheridos a las planchas de apoyo **figura 7.22b**. Estos pesos cumplen dos funciones: el largo de cada cilindro equivale a la distancia del centro de masa del etiquetador y el detector, y simular la masa de toda la estructura de acero inoxidable, sin contar los colimadores, que equivale a una masa de $26[kg]$.



(a) Modelo básico visto desde arriba. (b) Arreglo de fuerzas.

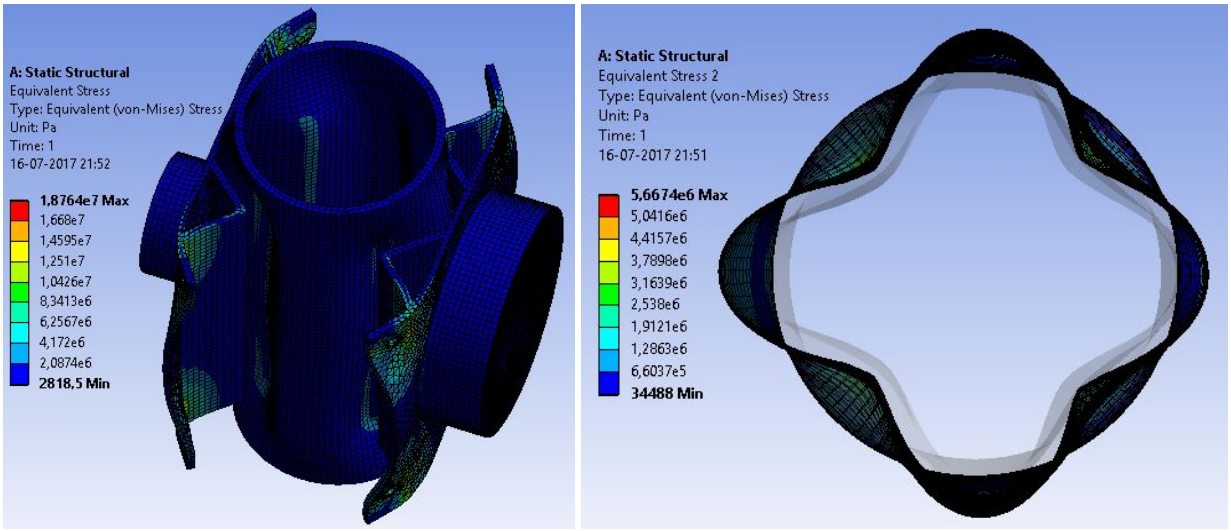
Figura 7.22: Demostración de parámetros para simulación.

Los parametros utilizados en esta simulación de Ansys son:

- Agregar propiedad de material de acero 316L a toda la estructura.
- Soportes de fijación puestos en cada extremo del tubo.
- Se agrega fuerza de gravedad.
- Se agrega una fuerza de magnitud $457[N]$, sobre la cara cilíndrica representativa al peso del etiquetador.
- Se agrega una fuerza de magnitud $106[N]$, sobre la cara cilíndrica representativa al peso del detector.

7.5.2 Primer análisis Ansys, usando fuerzas 276[N]

Para el primer análisis, se agregan fuerzas sobre las ocho áreas de esfuerzo de tensión con magnitud 276$[N]$, que simularán la presión de los espárragos que apretará el sistema de abrazadera alrededor del tubo minero.



(a) Primer análisis de estrés Von Mises total.

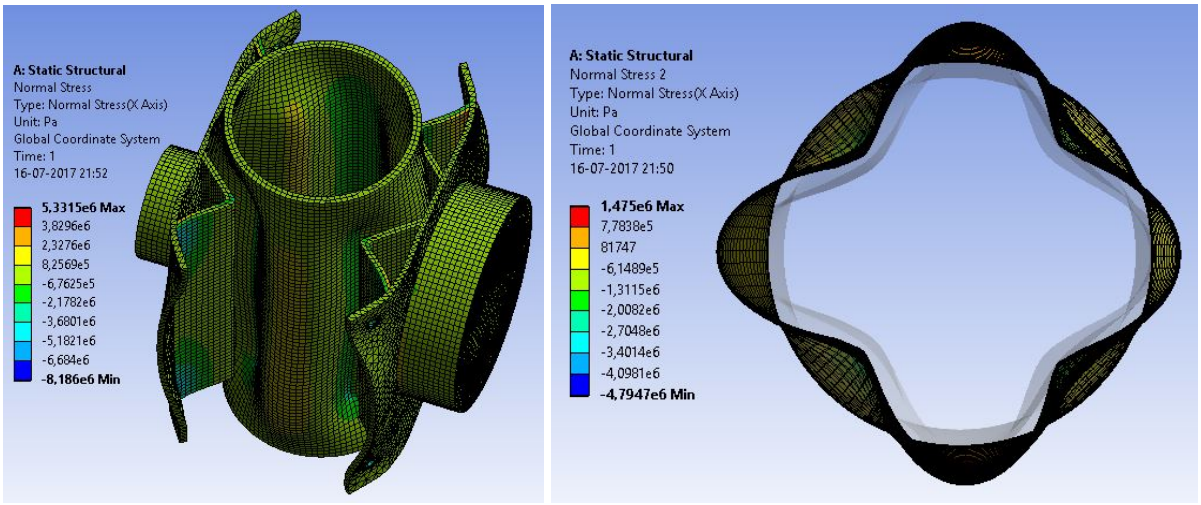
(b) Primer análisis de estrés Von Mises sobre tubo de concentrado.

Figura 7.23: Primer análisis esfuerzos Von Mises con 4,77[Mpa].

Tabla 7.4: Resultados de primer análisis de esfuerzos Von Mises, espárragos M10, carga 4,77$[Mpa]$.

Figura	Esfuerzo de prueba	Resistencia SS316L Fluencia-Tracción	Diámetro	Máx. Esf. Experimental	Indice Res. Fluencia%	Indice Res. Tracción%
7.23a	4,77$[Mpa]$	290$[Mpa]$-579$[Mpa]$	10$[mm]$	18,8$[Mpa]$	6,5%	3,2%
7.23b	4,77$[Mpa]$	290$[Mpa]$-579$[Mpa]$	10$[mm]$	5,67$[Mpa]$	1,9%	0,9%

Las tensiones de Von Mises sobre el tubo minero(**figura 7.23b**) apenas representan el 1,9% con respecto al esfuerzo de fluencia del acero inoxidable. Si bien el programa Ansys muestra con exageración las deformaciones sufridas en la estructura de acero, se puede observar una deformación no uniforme (vista superior) en el tubo minero. Las planchas que sostienen tanto al etiquetador(**figura 7.23a**), como al detector gamma, no deberían sufrir grandes deformaciones debido a que solo resisten un 6,5% del esfuerzo de fluencia recomendado.



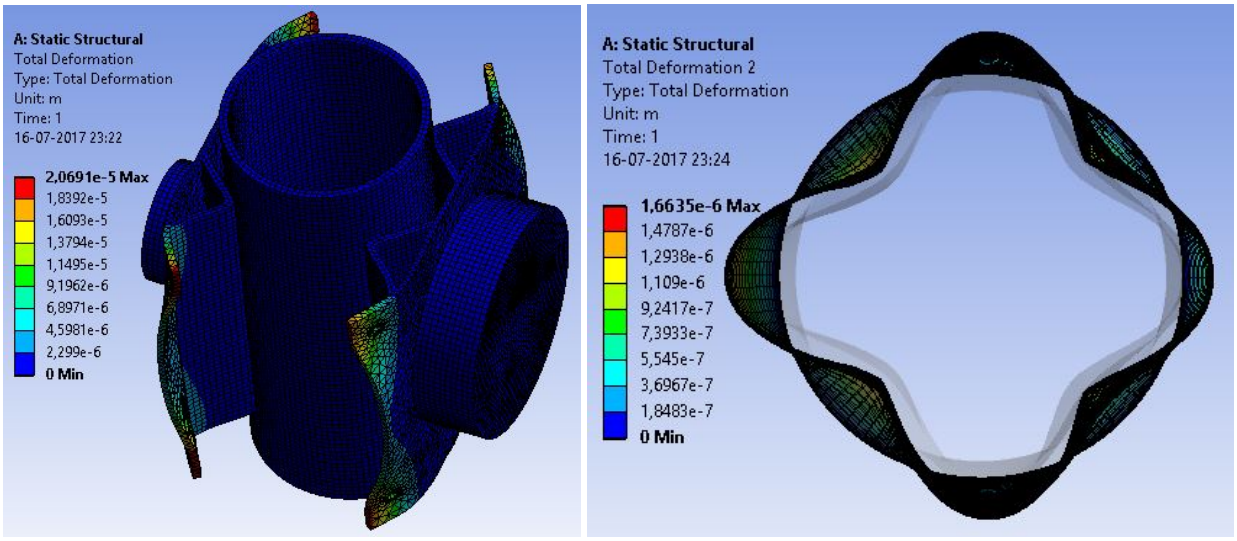
(a) Primer análisis de esfuerzos normales total (b) Primer análisis de esfuerzos normales sobre tubo de concentrado

Figura 7.24: Primer análisis de esfuerzos normales con 4,77[Mpa].

Tabla 7.5: Resultados de primer análisis de esfuerzos normales, espárragos M10, carga 4,77$[Mpa]$.

Figura	Esfuerzo de prueba	Resistencia SS316L Fluencia-Tracción	Diámetro	Máx. Esf. Experimental	Indice Res. Fluencia%	Indice Res. Tracción%
7.24a	4,77$[Mpa]$	290$[Mpa]$-579$[Mpa]$	10$[mm]$	8,19$[Mpa]$	2,8%	1,4%
7.24b	4,77$[Mpa]$	290$[Mpa]$-579$[Mpa]$	10$[mm]$	4,79$[Mpa]$	1,6%	0,8%

Teniendo en consideración que el programa Ansys muestra en colores cálidos a los esfuerzos de tracción, y en colores fríos a los esfuerzos de compresión. Se puede entender que las zonas azules son las que sufren el apriete de las abrazaderas. El tubo minero no corre riesgos(**figura 7.24b**), debido a que los esfuerzos normales sobre su cara externa representa apenas un 1,6% del esfuerzo de fluencia del acero inoxidable.



(a) Primer análisis de deformación total

(b) Primer análisis de deformación sobre tubo minero

Figura 7.25: Primer análisis de deformación estructural con 4,77[Mpa].

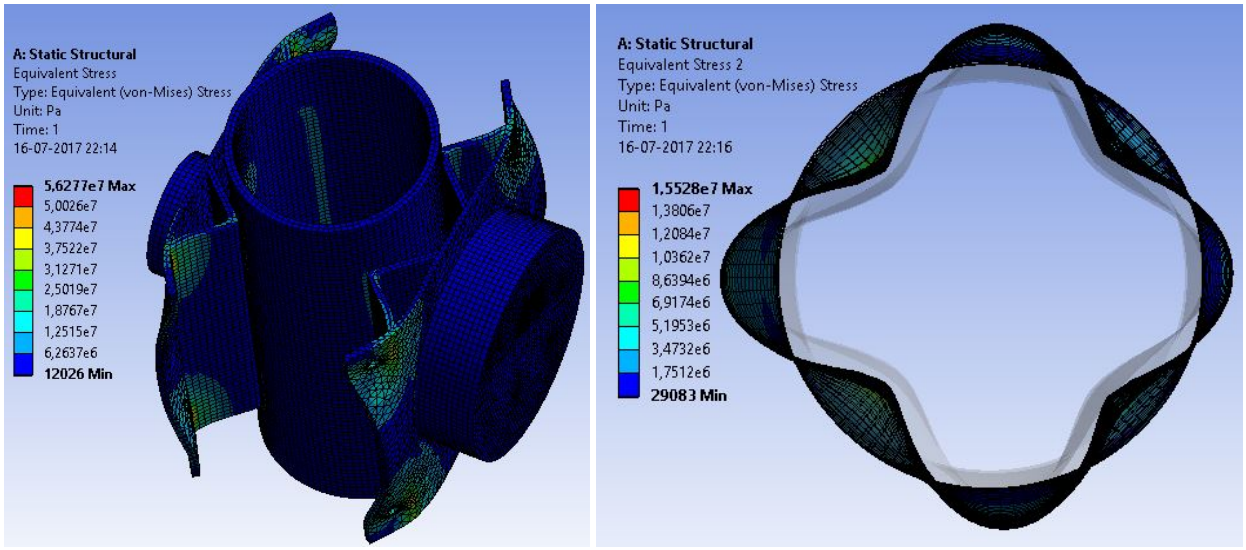
Tabla 7.6: Resultados de primer análisis de deformación plástica espárragos M10, carga 4,77$[Mpa]$.

Figura	7.25a	7.25b
Defor. experimental	0,02$[mm]$	0,0017$[mm]$

Las deformaciones son prácticamente imperceptibles, sin embargo será necesario hacer un estudio de las zonas de compresión del tubo minero para poder tener una idea sobre su deformación no uniforme. Este estudio será concretado mas adelante.

7.5.3 Segundo análisis Ansys, usando fuerzas de 829[N]

Para el segundo experimento, las fuerzas sobre las ocho áreas de esfuerzo de tensión, se aumentan hasta 829$[N]$. Considerando el supuesto que se trabajará con un factor de seguridad de 20, por sobre la mínima fuerza necesaria(tres veces 276$[N]$) para evitar que el sistema de abrazadera del densímetro nuclear no ceda y deslice ante factores externos no considerados a lo largo del tubo minero.



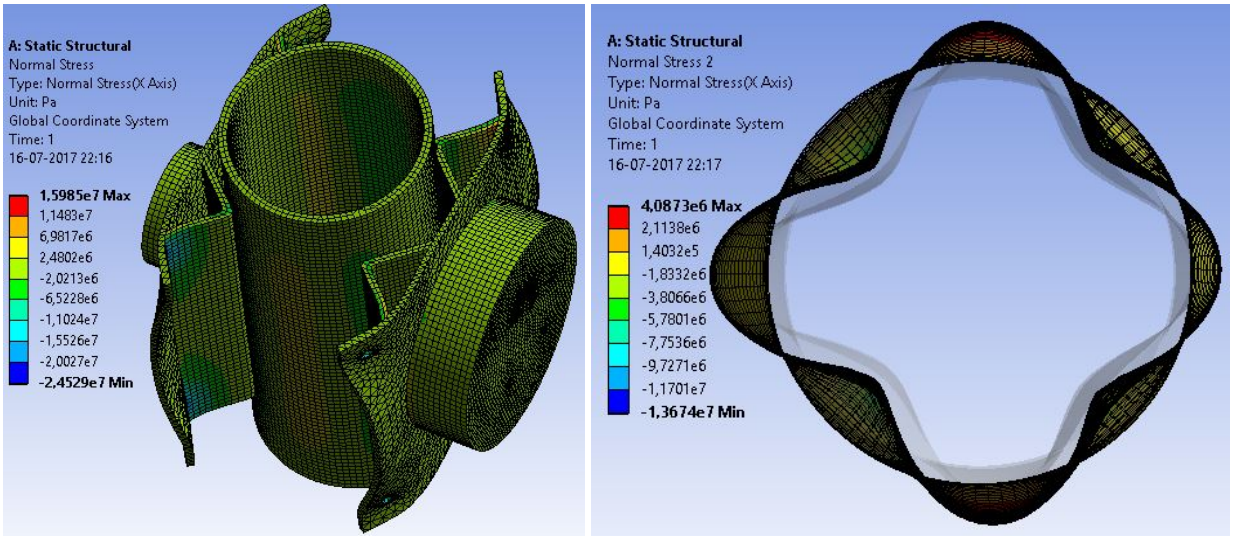
(a) Segundo análisis de estrés Von Mises total. (b) Segundo análisis de estrés Von Mises sobre tubo de concentrado.

Figura 7.26: Segundo análisis de Von Mises con 14,3[Mpa].

Tabla 7.7: Resultados de segundo análisis esfuerzos Von Mises, espárragos M10, carga $14,3[Mpa]$.

Figura	Esfuerzo de prueba	Resistencia SS316L Fluencia-Tracción	Diámetro	Máx. Esf. Experimental	Indice Res. Fluencia %	Indice Res. Tracción %
7.26a	14,3$[Mpa]$	290$[Mpa]$-579$[Mpa]$	10$[mm]$	56,3$[Mpa]$	19 %	9,7 %
7.26b	14,3$[Mpa]$	290$[Mpa]$-579$[Mpa]$	10$[mm]$	15,5$[Mpa]$	5,3 %	2,7 %

El segundo análisis de tensiones de Von Mises muestran que las planchas sostenedoras del etiquetador y el detector gamma(**figura 7.26a**), resisten esfuerzos de deformación iguales al 19 % del esfuerzo de fluencia recomendado. Esto podría significar una deformación visible, que alterará la alineación del haz gamma y el detector.



(a) Segundo análisis de estrés esfuerzos normales total

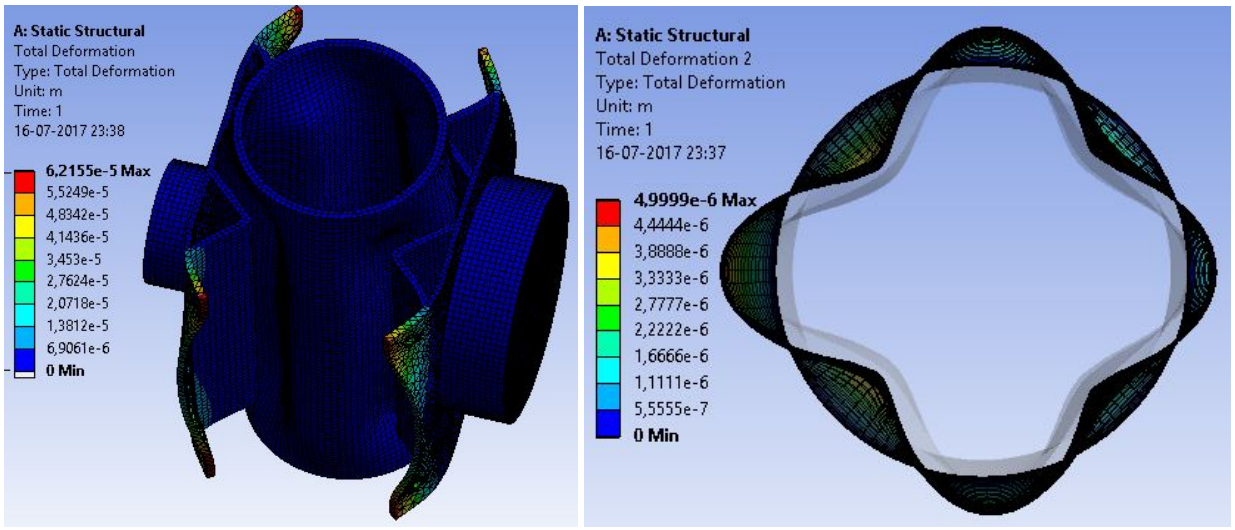
(b) Segundo análisis de esfuerzos normales sobre tubo de concentrado

Figura 7.27: Segundo análisis de esfuerzos normales con 14,3[Mpa].

Tabla 7.8: Resultados de segundo análisis esfuerzos normales, espárragos M10, carga 14,3$[Mpa]$.

Figura	Esfuerzo de prueba	Resistencia SS316L Fluencia-Tracción	Diámetro	Máx. Esf. Experimental	Indice Res. Fluencia %	Indice Res. Tracción %
7.27a	$14,3[Mpa]$	$290[Mpa]$-$579[Mpa]$	$10[mm]$	$24,53[Mpa]$	8,5 %	4,2 %
7.27b	$14,3[Mpa]$	$290[Mpa]$-$579[Mpa]$	$10[mm]$	$13,67[Mpa]$	4,7 %	2,4 %

Los esfuerzos de compresión, marcados por colores fríos, superan a los de tracción. En la **figura 7.27a**, los máximos esfuerzos de compresión que deforman las planchas sostenedoras, alcanzan un 8,5 % de la resistencia de fluencia del acero inoxidable. En cuanto a la cara externa del tubo minero(**figura 7.27b**), los esfuerzos normales de compresión máximos alcanzan un 4,7 % del máximo recomendado.



(a) Segundo análisis de deformación total

(b) Segundo análisis de deformación sobre tubo minero

Figura 7.28: Segundo análisis de deformación estructural con 14,3[Mpa].

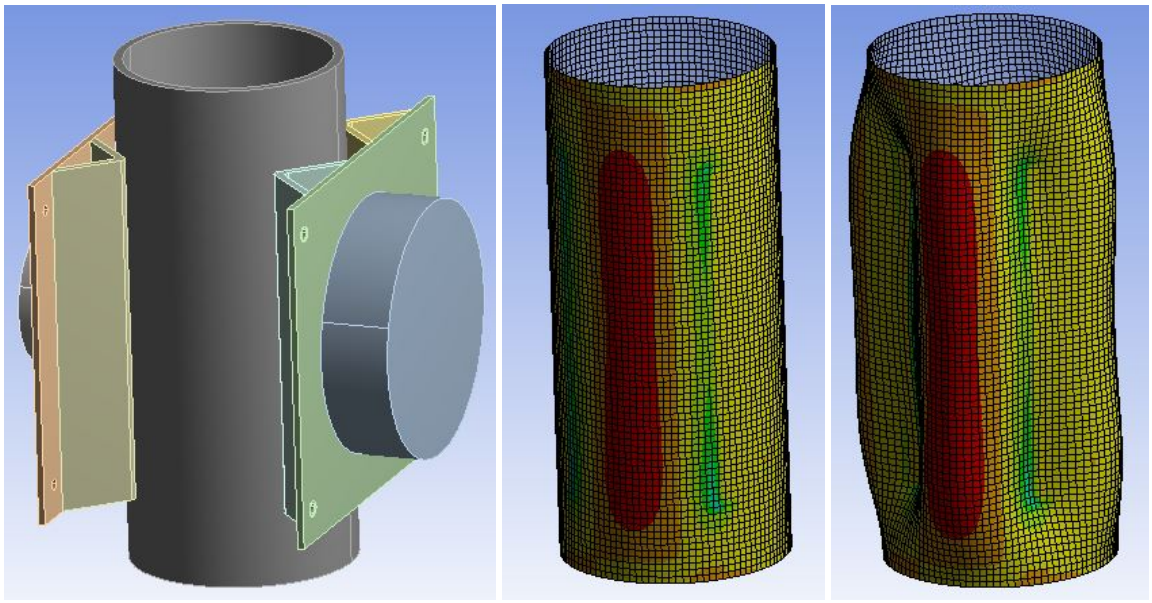
Tabla 7.9: Resultados de segundo análisis de deformación plástica espárragos M10, carga $14,3[Mpa]$.

Figura	7.28a	7.28b
Defor. experimental	$0,06[mm]$	$0,005[mm]$

Si bien el segundo análisis de tensiones Von Mises mostraba que algunas zonas del sistema de abrazadera alcanzaba un 19 % respecto al esfuerzo de fluencia. Las deformaciones mostradas en la simulación son muy pequeñas. Alcanzando, en la **figura 7.28a**, una deformación de $0,06[mm]$ en las esquinas de las placas sostenedoras, que es donde se ubican los espárragos.

7.6 Análisis de resultados en Ansys

Después de realizar el análisis Ansys para pernos de diámetro M10, se realizará un análisis de los datos para observar el comportamiento de la distribución de esfuerzos alrededor del tubo minero. Debido a que en el análisis Ansys se encontró una distribución no uniforme de los esfuerzos de compresión (**figura 7.29**), produciendo una deformación no homogenea como se ve en la **figura 7.30**. En esta sección se hará un análisis del motivo.



(a) Vista general tubo minero.

(b) Vista de esfuerzos normales externos.

(c) Vista de esfuerzos normales, exagerando la deformación.

Figura 7.29: Demostración de distribución de esfuerzos sobre tubo minero.

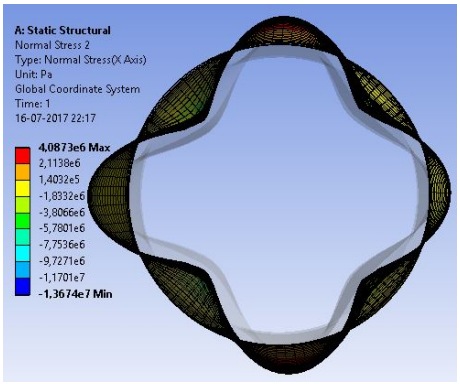
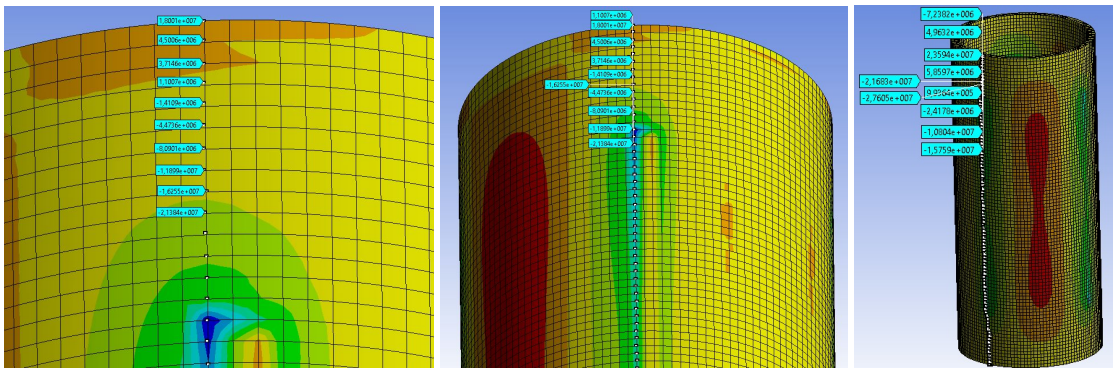


Figura 7.30: Vista superior de tubo minero, exagerando su deformación.

Para realizar esto se creo un mallado de 5$[mm]$ de espacio (**figura 7.31**). Se tomarán datos en una línea recta que recopile los esfuerzos normales de compresión críticos ejercidos sobre el exterior tubo minero. Los datos se ordenan en un gráfico que compara esfuerzos de compresión a lo largo del eje z.



(a) Vista de malla de 5(mm) de espacio. (b) Vista de linea recta de análisis de mallado de 5(mm). (c) Linea de análisis.

Figura 7.31: Ejemplo de creación de base de datos sobre malla.

Debido a que el tubo minero presenta una diferencia en la distribución de los esfuerzos normales ejercidos sobre la cara de este. Se recopilará información de ambos zonas de apoyo en forma de V, de las abrazaderas.

Se solicita al programa Ansys hacer un muestreo de los esfuerzos normales en zona de compresión ejercida por el detector de rayos gamma. Teniendo en cuenta que en la **figura 7.29c** se percibe una mayor carga de esfuerzos en el lado del detector:

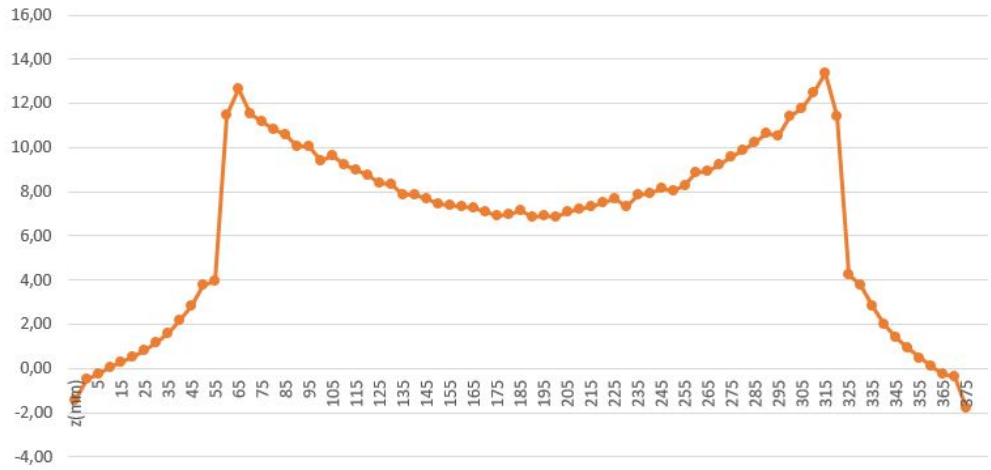


Figura 7.32: Base datos para esfuerzos normales sección detector gamma.

Observando el gráfico de esfuerzos versus distancia **figura 7.32**, primero hay que recalcar que los esfuerzos positivos son de compresión y los negativos son de tracción. El mayor valor de carga se encuentra en la distancia $65[mm]$ del tubo, que es la zona exacta donde el apoyo de la abrazadera se empieza a apoyar, que alcanza un valor de compresión de $12,6[Mpa]$. Posteriormente la distribución de cargas presenta la forma de una hipérbola, que termina en un máximo valor de carga $13,3[Mpa]$, levemente superior al mayor valor anteriormente mencionado. Este punto representa la distancia $325[mm]$, el final del apoyo de la abrazadera.

Ahora observando el gráfico de esfuerzos normales versus distancia, en el etiquetador (**figura 7.33**):

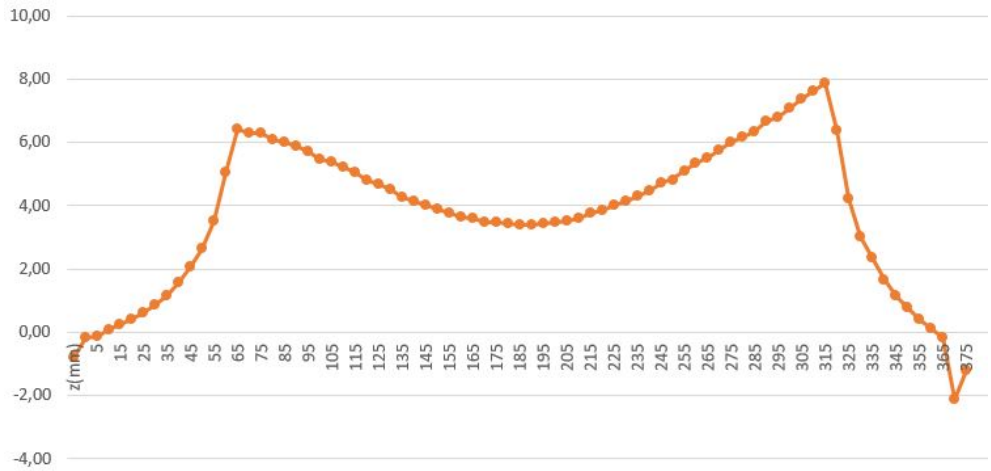


Figura 7.33: Base datos para esfuerzos normales sección etiquetador.

La diferencia entre máximos puntos de carga de la hipérbola mostrada radica en el momento ejercido por el propio peso del detector gamma y el etiquetador. Siendo que el etiquetador es mucho mas pesado que el detector, entonces la hipérbola tendrá una leve inclinación hacia el lado inferior del tubo minero, que en el gráfico representa la distancia $325[mm]$. Esto significa que los momentos ejercidos por los pesos, cambian la uniformidad de la distribución de los esfuerzos de una abrazadera.

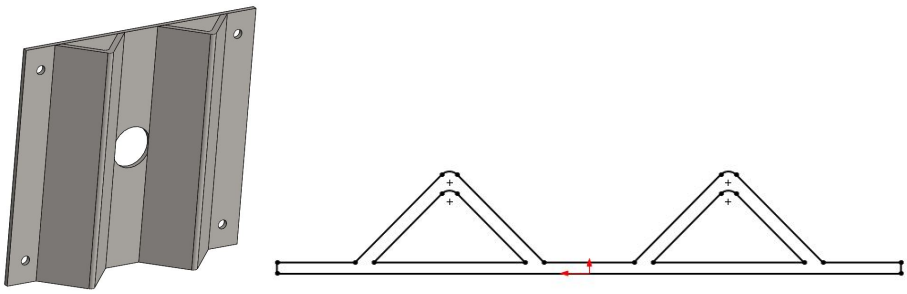
Esta explicación puede trasladarse al porque existe una mayor deformación o concentración de cargas en la zona del detector gamma. Tal como se ve en la **figura 7.29c** y **figura 7.30**, la diferencia de pesos entre las dos secciones de la abrazadera, hacen que el apoyo ubicado al lado opuesto de la masa de mayor peso, se deforme mas.

7.7 Nuevo diseño de abrazaderas

Si bien en los puntos anteriores se ha demostrado que la deformación total de las placas sostenedoras es mínima, pero en la practica estas demostraron una flexión notoria. Es por esto que se realizará un re-diseño de las placas sostenedoras que sostienen a las fuentes y a los detectores gamma, para prevenir esta flexión generada específicamente por la pre-carga de los pernos, que ademas puede perjudicar en la alineación necesaria para disminuir la incertidumbre de las mediciones de coincidencias que el haz gamma genera sobre el cristal centelleador.

La razón por la que las placas sostenedoras se flectan, es por su insuficiente momento de área el cual genera una concentracion de esfuerzos que vencen la zona elástica de la plancha con facilidad. Para el primer diseño se utiliza una placa cuadrada de espesor $5[mm]$ donde se sueldan dos perfiles triangulares que harán el contacto con el tubo minero. Este diseño es común entre densímetros ya comercializados (**figura 7.34**).

Utilizando el mismo software de diseño SolidWorks, se obtiene el momento de inercia principal de la placa sostenedora común:



(a) Placa sostenedora común.

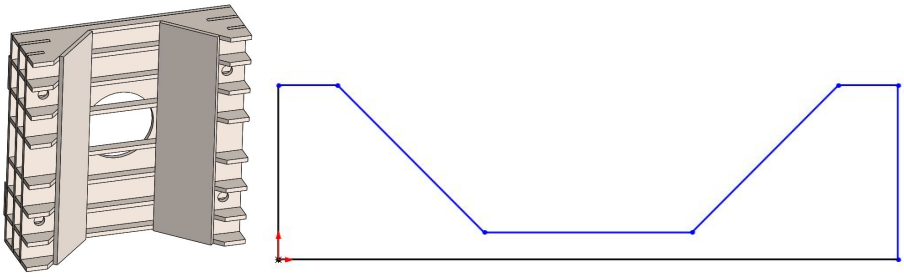
(b) Perfil placa sostenedora.

Figura 7.34: Vistas placa sostenedora común.

Área $[mm^2]$	**C. de gravedad** $[mm]$	**M. principal de inercia** $[mm^4]$
5525,97	$X = 95{,}3$	$Px = 31616416{,}64$
	$Y = 0$	$Py = 32361266{,}10$
	$Z = 0$	$Pz = 62019575{,}64$

7.7.1 Nuevo diseño de abrazaderas con placa corregida

Para solucionar el problema de la flexión, que compromete a la alineación del haz gamma con el detector. Se creo un nuevo diseño que aumente el momento de inercia principal de la placa sostenedora común y que disminuye la pared de atenuación del haz gamma desde $10[cm]$ hasta $5[cm]$, por lo tanto toda la estructura disminuirá su tamaño y peso. Se mantuvo la idea del apoyo de $1[mm]$ de los perfiles en "V", pero se aumentará el área perpendicular que, finalmente, aumentará el momento de inercia principal (**figura 7.35**):



(a) Placa sostenedora corregida.

(b) Perfil placa sostenedora corregida.

Figura 7.35: Vistas placa sostenedora corregida.

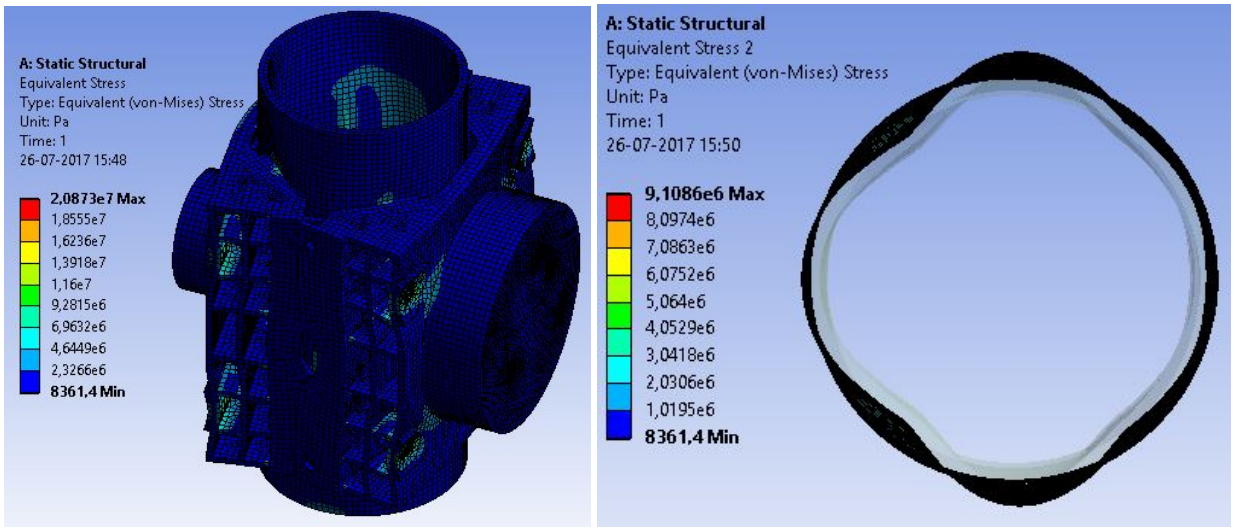
Área $[mm^2]$	**C. de gravedad** $[mm]$	**M. principal de inercia** $[mm^4]$
8613,11	$X = 0$	$Px = 57288736{,}88$
	$Y = 27{,}5$	$Py = 75717016{,}03$
	$Z = 0$	$Pz = 123690813{,}42$

El trasfondo de aumentar el área perpendicular al esfuerzo aplicado sobre la placa, es para obtener una mejor resistencia a las cargas internas de tracción y compresión. El indicador de aumento del momento de inercia entre el modelo común y el corregido se puede ver en la siguiente tabla:

M.P.I	**Placa común** $[mm^4]$	**Placa corregida** $[mm^4]$	**Indicador**
Px	31616416,64	57288736,88	$+81\,\%$
Py	32361266,10	75717016,03	$+134\,\%$
Pz	62019575,64	123690813,42	$+99\,\%$

7.7.2 Tercer análisis Ansys, usando fuerzas de 829[N], sobre placa sostenedora re-diseñada

Al igual que los análisis de elemento finito anteriores, se analizará la resistencia a la fuerza $829,2[N]$ de los espárragos M10 correspondiente a una carga de $14,3[Mpa]$. Estos resultados se compararan a los obtenidos en el segundo análisis de elemento finito que corresponden a la **tabla 8.10**.



(a) Tercer análisis de estrés Von Mises total.

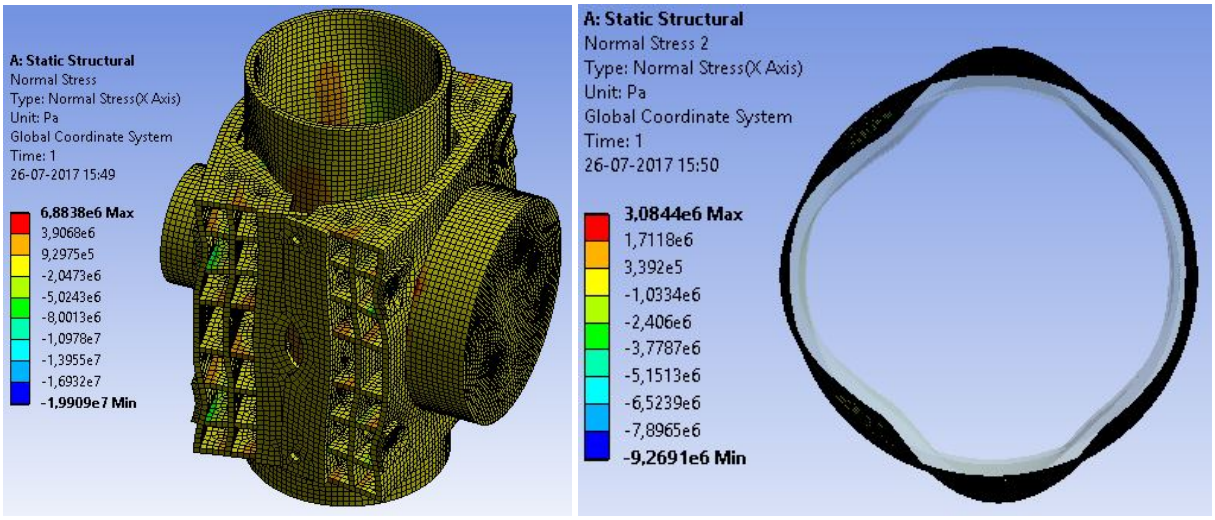
(b) Tercer análisis de estrés Von Mises sobre tubo de concentrado.

Figura 7.36: Tercer análisis de Von Mises con 14,3[Mpa].

Tabla 7.10: Resultados de tercer análisis de esfuerzos Von Mises, espárragos M10, carga $14,3[Mpa]$.

Figura	Esfuerzo de prueba	Resistencia SS316L Fluencia-Tracción	Diámetro	Máx. Esf. Experimental	Indice Res. Fluencia %	Comparación Esfuerzos %
7.26a	$14,3[Mpa]$	$290[Mpa]$-$579[Mpa]$	$10[mm]$	$56,3[Mpa]$	19 %	– %
7.36a	$14,3[Mpa]$	$290[Mpa]$-$579[Mpa]$	$10[mm]$	$20,9[Mpa]$	7,2 %	37 %
7.26b	$14,3[Mpa]$	$290[Mpa]$-$579[Mpa]$	$10[mm]$	$15,5[Mpa]$	5,3 %	– %
7.36b	$14,3[Mpa]$	$290[Mpa]$-$579[Mpa]$	$10[mm]$	$9,1[Mpa]$	3,1 %	59 %

Comparando con los resultados obtenidos en la **tabla 8.10** que corresponden al segundo análisis de esfuerzos de Von Mises. En general hay una reducción del máximo esfuerzo de Von Mises en un 63 %, desde $56,3[Mpa]$ hasta $20,9[Mpa]$. Sobre el tubo minero hay una reducción del máximo esfuerzo de Von Mises en un 41 % desde $15,5[Mpa]$ hasta $9,1[Mpa]$.



(a) Tercer análisis de estrés esfuerzos normales total.

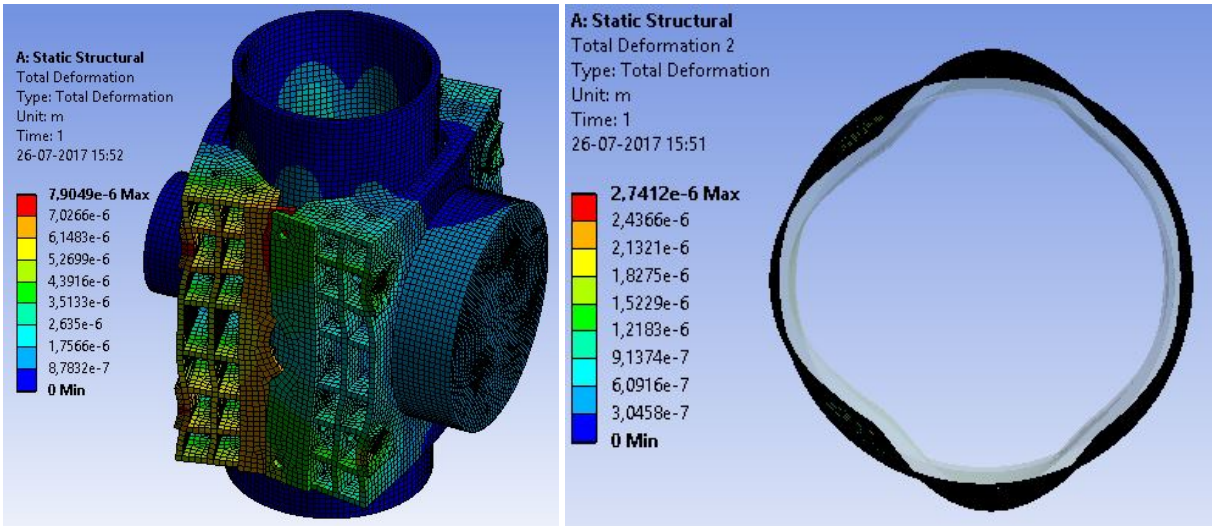
(b) Tercer análisis de esfuerzos normales sobre tubo de concentrado.

Figura 7.37: Tercer análisis de esfuerzos normales con 14,3[Mpa].

Tabla 7.11: Resultados de tercer análisis esfuerzos normales, espárragos M10, carga 14,3$[Mpa]$.

Figura	Esfuerzo de prueba	Resistencia SS316L Fluencia-Tracción	Diámetro	Máx. Esf. Experimental	Indice Res. Fluencia %	Comparación Esfuerzos %
7.27a	14,3$[Mpa]$	290$[Mpa]$-579$[Mpa]$	10$[mm]$	24,53$[Mpa]$	8,5 %	– %
7.37a	14,3$[Mpa]$	290$[Mpa]$-579$[Mpa]$	10$[mm]$	6,88$[Mpa]$	2,4 %	28 %
7.27b	14,3$[Mpa]$	290$[Mpa]$-579$[Mpa]$	10$[mm]$	13,67$[Mpa]$	4,7 %	– %
7.37b	14,3$[Mpa]$	290$[Mpa]$-579$[Mpa]$	10$[mm]$	3,1$[Mpa]$	1 %	22,7 %

Estos resultados se compararan a los obtenidos en el segundo análisis de esfuerzos normales, que corresponden a la **tabla 8.11**. En general hay una reducción del máximo esfuerzo normal en un 72 %, desde 24,53$[Mpa]$ hasta 6,88$[Mpa]$. Sobre el tubo minero hay una reducción del máximo esfuerzo normal en un 77,3 % desde $13,67[Mpa]$ hasta $3,1[Mpa]$.



(a) Tercer análisis de deformación total

(b) Tercer análisis de deformación sobre tubo minero

Figura 7.38: Tercer análisis de deformación estructural con 14,3[Mpa].

Tabla 7.12: Resultados de tercer análisis de deformación plástica espárragos M10, carga $14,3[Mpa]$.

Figura	7.28a	7.38a	7.28b	7.38b
Defor. experimental	$0,06[mm]$	$0,008[mm]$	$0,005[mm]$	$0,003[mm]$
Comp. experimental	$-\%$	13%	$-\%$	60%

Estos resultados se compararan a los obtenidos en el segundo análisis de deformación que corresponden a la **tabla 8.12**. En general hay una reducción de la deformación máxima en un 87%, desde $0,06[mm]$ hasta $0,008[mm]$. Sobre el tubo minero hay una reducción de la deformación máxima en un 40%, desde $0,005[mm]$ hasta $0,003[mm]$.

7.8 Diseño de Litodensitometro

Como se mencionó en la **sección 4.1.3**, sobre el diseño del densímetro doble y posteriormente haber mostrado el diseño de un mecanismo de abrazadera eficiente para cargar grandes pesos y distribuir su carga a través del tubo minero sin generar deformaciones en este. Se mostrará el diseño final del **Litodensitometro**, o densímetro doble, que es el objetivo final del diseño de esta memoria. El diseño de **Litodensitometro** exige dos requisitos:

- **Crear una abrazadera que pueda sostener a cuatro elementos en lugar de dos.**
- **Cuidar las alineaciones del haz gamma de las dos fuentes que deben irradiar la misma zona al mismo tiempo.**

En los primeros diseños del **Litodensitometro** (**figura 7.39**) la alineación de las cuatro piezas planteaba un serio problema, y su sistema de abrazadera era complicado de fijar al tubo, ya que el sistema de apriete constaba de ocho pernos. Por lo que tampoco era seguro que la calidad superficial de las placas soportantes se pudiera mantener con el apriete de doce pernos. Se pensó en un sistema de alineación vertical por platos, como los primeros diseños, pero esta idea fue descartada ya que también utilizaba pernos para su fijación y esta quedaba expuesta a moverse y sacrificar la alineación de todas formas.

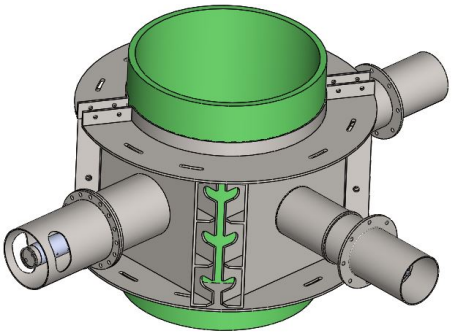


Figura 7.39: Isometrica de viejo diseño Litodensitometro.

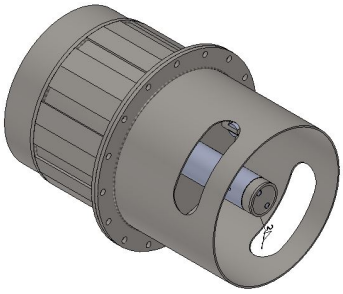


Figura 7.40: Isométrica de viejo diseño Etiquetador.

Manteniendo el diseño de ángulos sólidos, la primera gran modificación que se hizo fue en el peso del etiquetador, según los resultados obtenidos del estudio de atenuación de radiación gamma (**Na-22**) por una pared de plomo. El espesor de estas paredes de atenuación pueden ser reducidas desde $100[mm]$ hasta los $50[mm]$(**sección 7.2**), pero debido a que existe un sistema de disparador(Colimador obturador) que genera un agujero adicional de $15[mm]$ a lo largo de los dos colimadores, se decidió utilizar un espesor de pared de $60[mm]$. Esto disminuye el peso total del etiquetador desde $47[Kg]$ hasta los $17[Kg]$. Lo que significa una disminución de un $64\,\%$ que facilitará el transporte de la fuente, sin que el personal sufra un exceso de dosis de radiación, que es uno de los puntos importantes del diseño.

Para solucionar el problema del montaje de cuatro elementos sobre la abrazadera. Se utilizó el nuevo diseño de abrazadera con placa corregida(mostrada en la **sección 7.7.1**), y se le añadió una interfaz para montar una nueva placa o plancha sostenedora **(figura 7.41)**. Tomando en cuenta el cambio de pared de atenuación, más los menores diámetros de tubos de acero para sostener el plomo. El cambio del peso total de la estructura de acero bajó hasta los $22[kg]$, lo que representa una disminución del $15\,\%$ de los $26[kg]$ que tenia el modelo anterior.

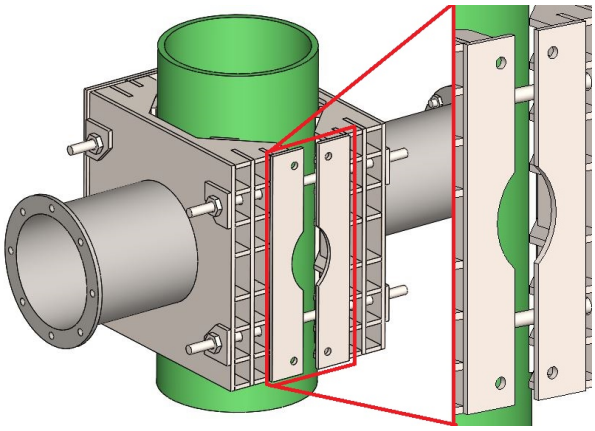
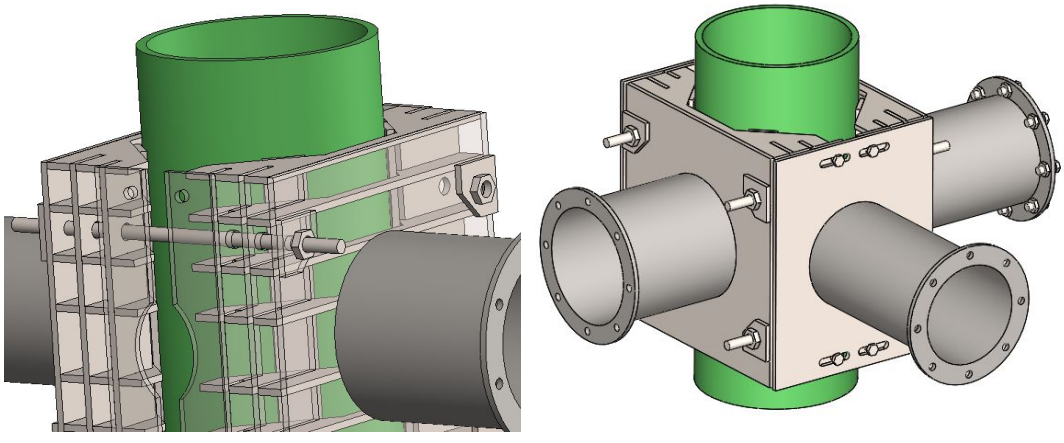


Figura 7.41: Vista de interfaz de montaje lateral.

Explicación de instalación de Litodensitometro

El primer paso de instalación del **Litodensitometro**, es el posicionamiento de las interfaces que sostendrán las fuentes y detectores. La ventaja de este diseño radica en la facilidad de alinear las planchas sostenedoras debido al arreglo de agujeros concentricos ubicados en las esquinas de estas y donde van ubicados los esparragos(**figura 7.42a**). Además el montaje de las planchas laterales utilizan la misma alineación de las previas planchas, donde la plancha lateral es montada y fijada por pernos M8(**figura 7.42b**).



(a) Alineación de planchas

(b) Montaje plancha lateral, sin peso añadido

Figura 7.42: Instalación de interfaces.

Después de realizar una instalación soportando unicamente el peso de la estructura de acero, con el objetivo de facilitar la alineación de las planchas sostenedoras. Se realiza la colocación de las fuentes y sus respectivos detectores, como se ve en las siguientes **figuras 7.43 y 7.44**:

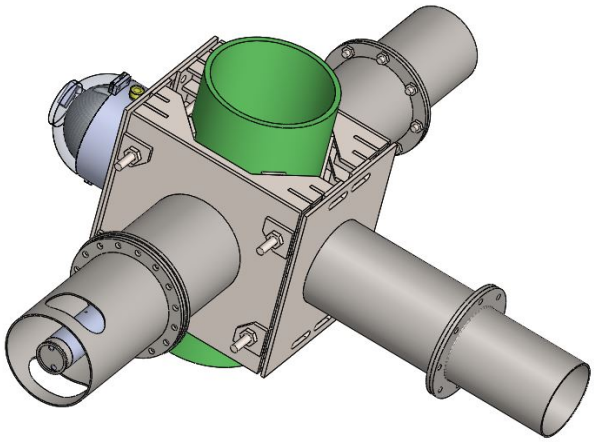
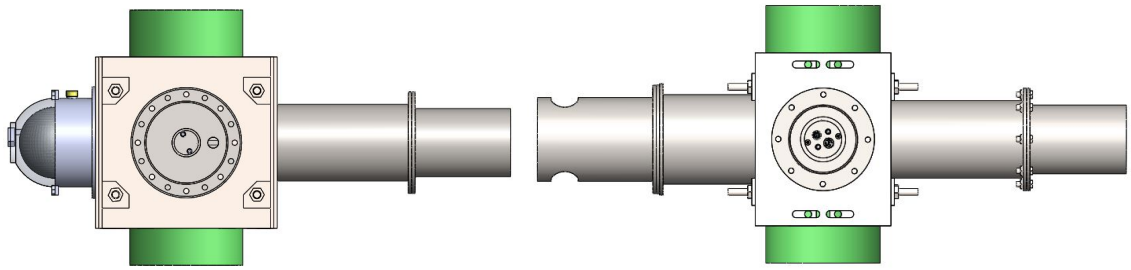


Figura 7.43: Vista isometrica de montaje plancha lateral.



(a) Vista lateral de fuente de Co-60 y su detector (b) Vista lateral de etiquetador con fuente de Na-22 y su detector

Figura 7.44: Vistas laterales de montaje de fuentes y su detector.

El peso total del diseño antiguo del densímetro con etiquetador es de 83,4$[Kg]$, mientras que el diseño del **Litodensitometro** que posee un diseño reducido del etiquetador, posee un peso total de 76,6$[Kg]$. Lo que plantea una reducción de peso total del 8,2 % contando con la presencia de una fuente y un detector adicional. Mientras que las mediciones de esfuerzos realizadas en el tercer análisis Ansys(**sección 7.7.2**) mostraron un funcionamiento positivo, con una carga de 14,3$[Mpa]$, más el peso total del antiguo diseño de etiquetador. Se puede comprobar la efectividad de la mejora del nuevo diseño.

Capítulo 8

Conclusiones

En esta memoria se ha entregado un estudio detallado sobre el diseño de un densímetro nuclear doble. Este es el resultado de un diseño previo de un densímetro con etiquetador, el cual fue realmente construido.

Revisando los objetivos de la memoria, se mostró en detalle la estructura, componentes internos y diseño. Ademas se explico en profundidad el funcionamiento del densímetro y el de cada uno de sus componentes. También se realizó un estudio de estado del arte en profundidad que mostró las bases de un análisis de Casa de Calidad(QFD) y su selección de conceptos clave para seleccionar el diseño mas eficiente. Este proceso terminó en la selección del sistema de abrazaderas que utiliza una combinación de una interfaz modular de planchas sostenedoras y la utilización de esparragos como mecanismo de apriete y alineación.

Posteriormente se entregó información acerca del riesgo que puede afectar la salud del personal, el trabajar con fuente radiactivas. Se explicó lo que es la dosimetría y sus eventuales síntomas ante la exposición prolongada, se explicó el diseño de paredes atenuadoras de rayos gamma y finalmente como controlar el flujo de partículas mediante ángulo sólido.

En cuanto al resistencia a la inmersión en agua para alcanzar la norma IP66/67, se tomó la decisión de descartar la idea. Debido a que una condición de inmersión en agua para un densímetro nuclear no es algo común en una minera. Sin embargo se hizo un alcance de protección ante el polvo y el roció de agua lluvia, que equivaldría a ser una norma IP65. En cuanto a la norma ATEX, se ideó que la estructura interna que contiene a la electrónica, este hecha de plástico para evitar puntos de ignición ante un eventual catástrofe explosiva.

Respecto al análisis de resultados, el desarrollo del densímetro con etiquetador demostró en la teoría, que el sistema de abrazadera funcionaba exitosamente bajo parámetros muy seguros, sin embargo en la practica este poseía una falla en la alineación del haz gamma a causa de la flexión ejercida por las cargas, generadas

por los esparragos, en los extremos de las planchas sostenedoras. Siendo que este diseño posee un sistema de abrazadera similar que se encuentra en otros diseños comerciales de densímetros nucleares. Es por esto que no se pudo utilizar ese diseño de abrazadera y tuvo que diseñarse un nuevo sistema de planchas sostenedoras que estuviera preparado para el **Litodensitometro**.

Para el nuevo diseño de las planchas sostenedoras, los resultados obtenidos del análisis de elementos finitos arrojó resultados bastante prometedores en cuanto a la rigidez que se busca para cuidar la alineación del haz gamma y su respectivo detector. Esto se consiguió aumentando el momento de inercia en el perfil perpendicular a la planchas y también reforzando los agujeros donde se apoyan y generan carga los espárragos. Finalmente se puede afirmar que el diseño final del **Litodensitometro** tiene fuertes ventajas en cuanto a su fácil transporte, ensamblaje y su luminosa alineación. Frente a cualquier modelo comercial que utilice un sistema de abrazaderas, el nuevo diseño de sistema de abrazaderas presenta un avance simple pero eficiente, utilizando los mismos materiales y recursos por lo que también es económicamente viable.

Índice de Anexos A

Norma ISO 2919:2012

ISO 2919:2012 establece un sistema de clasificación para sellado de fuentes radioactivas que están basadas en pruebas de eficacia y especifican requerimientos generales. Pruebas como eficiencia, producción, marca y certificación. Esta provee una lista de prueba para que los productores de sellado de fuentes radioactivas puedan evaluar la seguridad de estos productos, ya sea en uso selectivo para ciertos tipos de aplicaciones requeridas. Un ejemplo puede ser la protección contra el material radioactivo, que emite radiación ionizante.

Índice de Anexos B

Análisis QFD

Figura B.1: Tabla de Casa de Calidad

Índice de Anexos C

Norma Atex - Protección de explosiones

Para diseñar un producto acorde a la normativa ATEX es necesario seguir un ”marco legislativo de seguridad y salud”, distado por el mercado Europeo. Esta legislación consta de tres partes:

- **Regulation (EC) 765/2008** la cual establece los requerimientos para la acreditación y la vigilancia de los productos registrados.
- **Decisión 768/2008** Sobre un marco común para la comercialización de los productos, incluye proveer de referencias que deban incorporarse en caso de que el producto sea revisado. En efecto, es una plantilla para la futura legislación de armonización de productos.
- **Regulation (EC) 764/2008** Estableciendo procedimientos relacionados a la aplicación de ciertos tecnicismos legales nacionales a productos comercializados en otros países de la unión Europea.

Otros requerimientos esenciales respecto a la salud y el cuidado(EHSRs). Están listados en ”Anexo II” y desde la norma ATEX 2014/34/EU guidelines - 1^{st} Edition - April 2016[18] tienen requisitos específicos como:

- Potenciales fuentes de ignición de equipo pensado para ser usado en una atmósfera potencialmente presente de explosivos.
- Sistema de protección autónoma pensados para operar después de sucedida una explosión, con el objetivo principal de detener la explosión de forma inmediata y/o limitar los efectos de las flamas y presiones.
- Mecanismos de seguridad destinados para contribuir en el funcionamiento seguro del dispositivo y del sistema de protección autónoma, si este esta expuesto a alguna fuente de ignición.
- Componentes sin función autónoma esencial para el funcionamiento seguro del dispositivo o el sistema de protección autónoma.

Índice de Anexos D

Los requerimientos ATEX

La normativa ATEX requiere que se cumplan los siguientes elementos, para proveer del sello ATEX:

- **El sello CE** La sello CE es una auto explicativo logo que indica que el equipo cumple con las disposiciones técnicas y requisitos ATEX y otras directivas.
- **Requisitos de seguridad y salud esenciales** Bajo el marco legislativo de seguridad y salud. El ”Anexo II de la directiva ATEX”, requiere que se establezcan principios de seguridad integrada para todas las fuentes de ignición eléctricas y no eléctricas. Se puede demostrar el cumplimiento de estos requisitos buscando la norma Europea EN 60079.
- **Certificado de examinación tipo EC** Para categoría uno (equipos eléctricos y mecánicos) y categoría dos (equipos eléctricos). Un ”organismo de certificación” deberá verificar que su equipo cumpla con todas las necesidades de la norma ATEX pertinentes, para recibir el ”Certificado de examinación tipo EC”. Para equipos de categoría tres, no se requiere una certificación tipo EC, sin embargo los fabricantes deben asegurarse que sus productos cumplan con la norma ATEX, siguiendo una ruta de trabajo.
- **Evaluación de calidad** Las instalaciones que producen su equipo deben poseer una evaluación de calidad tipo **EN ISO/IEC 80079-34** que llegara a un organismo de certificación para entregarle una certificación de garantía de calidad(QAN).

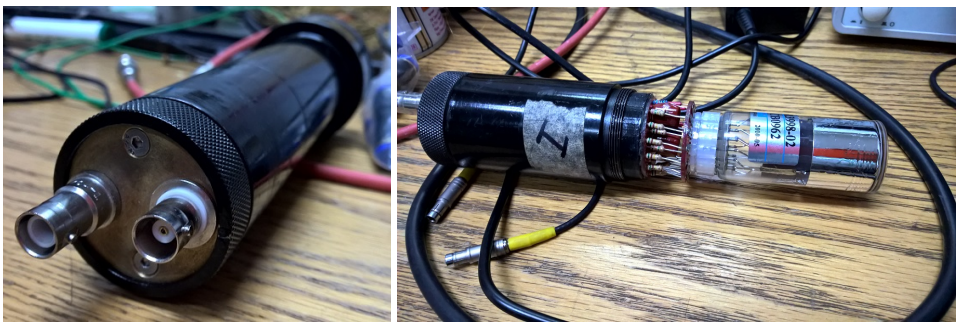
D.1 ¿Cómo se relaciona el Litodensitometro con la norma ATEX?

Según el estudio de patentes realizado previamente para conocer a la competencia. Uno de los llamativos puntos en común del diseño de todos los densímetros, ya sean nucleares o no, es la norma anti explosiones ATEX.

Debido a que todo densímetro posee un adquisidor de datos, significa que este posee un sistema eléctrico que puede ser un potencial generador de ignición(**figura D.1**), estando expuesto a una atmósfera de riesgo explosivo. Dentro de las mineras existen un sinnúmero de elementos explosivos, como por ejemplo el ANFO. Es por esto que se utilizan elementos electrónicos certificados para atmósferas de riesgo de explosión, pero esa es una sección que no corresponde a esta memoria.

Otro punto de vista que esta relacionado a esta norma, pero no esta tomado en cuenta salvo en el requisito de calidad de producto(QAN), es el peligro de contaminación por esparcimiento del isótopo radiactivo. El equipo debe ser capaz de mantener a la fuente gamma cautiva dentro de este, resistiendo altos impactos, altas presiones y temperaturas.

Si bien los parámetros anteriormente mencionados pueden ser controlados por una asociación de control de calidad. La dosimetría generada a partir de una modificación de pared de protección de plomo por exposición a explosiones. Es un trabajo de la Comisión Chilena de Energía Nuclear(CCHEN).



(a) Vista de conexiones eléctricas (b) Análisis de deformación sobre tubo minero

Figura D.1: Electronica de un densímetro.

En caso de querer certificar un diseño comercial de **Litodensitometro** en el extranjero. Primero el diseño del densímetro deberá ser aprobado por la Comisión Chilena de Energía Nuclear. Posteriormente se deberá obtener una certificación de control de calidad(QAN) para ambientes explosivos, que vendrá a ser una evaluación tipo **EN ISO/IEC 80079-34**. Finalmente se deberá solicitar el sello ATEX para certificar que el equipo es apto para trabajar en zonas de riesgo explosivos.

Índice de Anexos E

Protección IP 65

El **grado de protección IP** hace referencia a la norma internacional *IEC* 60529 *Degrees or protectión* utilizado con mucha frecuencia en los datos técnicos de equipamiento eléctrico o electrónico, en general de uso industrial como sensores, medidores, controladores, etc.(**figura E.1**)

Mediante la asignación de diferentes códigos numéricos, el grado de protección del equipamiento puede ser identificado de manera rápida y con facilidad.

De esta manera, un grado de protección IP65, indica que:

- Las letras IP identifican al estándar *"Ingress Protection"*
- El primer dígito "6" describe el nivel de protección ante el polvo, en este caso : *"El polvo no debe entrar bajo ninguna circunstancia."*
- El segundo valor "5" describe el nivel de protección frente a líquidos (normalmente agua), que cita: *"El objeto debe resistir (en todas direcciones) los chorros de agua."*



Figura E.1: Tubo que necesita proteger electrónica.

Índice de Anexos F

Composición del flujo de concentrado de cobre

El proceso operativo de obtención del mineral comienza con la extracción de millones de toneladas al año de mineral con una ley del 1 %. Pasando por sucesivas etapas de transporte, chancado y molienda, para lograr las condiciones de tamaño, dureza y calidad necesarias para la flotación. Durante el proceso de flotación, se obtiene un concentrado de cobre.

El concentrado de cobre seco está compuesto idealmente de 31 % de cobre (Cu, número atómico 29) el cual se somete a separación por medio de un proceso de Pirometalurgia en grandes hornos que funcionan a altas temperaturas. Es una pulpa espesa obtenida de la etapa de flotación en el proceso productivo, en la que se encuentra una mezcla de sulfuro de cobre, fierro y una serie de sales de otros metales. Posee una humedad de alrededor del 8 %, ya que con valores superiores, el concentrado se comporta como un barro difícil de manipular y exige más energía para la fusión.

Generalmente en la capa superior se encuentran los **minerales oxidados (cuprita)**, junto a cobre nativo en pequeñas cantidades, lo que explica su elaboración milenaria ya que el metal podía extraerse fácilmente en hornos de fosa. Por debajo del nivel freático (nivel mar), se encuentran las **piritas (sulfuros)**, **primarias calcosina (S2Cu)**, **covellina (SCu)** y las **secundarias calcopirita (S2FeCu)**. Acompañando a estos minerales se encuentran otros como la bornita (Cu5FeS4), los cobres grises, los carbonatos azurita y malaquita, que suelen formar masas importantes en las minas de cobre por ser la forma en la que usualmente se alteran los sulfuros.

Finalmente, junto a estos, los lodos se recuperan además el **oro (Au)**, **plata (Ag)**, **platino (Pt)**,**molibdeno (Mo)**,**Zinc (Zn)**, **azufre (S)**, **silice (Si)** y **fierro (Fe)** entre otros. Su proporción depende de la mineralogía de la mina. Los rangos de fluctuación de la composición química del concentrado de cobre, son mostrados en la **tabla F.1**:

Tabla F.1: Tabla de composición de concentrado de cobre

Mineral	Rango Inferior	Rango Superior
Cobre(Cu)	29,70 %	46,00 %
Oro(Au)	1,0(ppm)	3,5(ppm)
Plata(Ag)	46(ppm)	90(ppm)
Molibdeno(Mo)	0,07 %	0,35 %
Asufre(S)	25 %	33 %
Zinc(Zn)	0,15 %	0,25 %

Índice de Anexos G

SS200

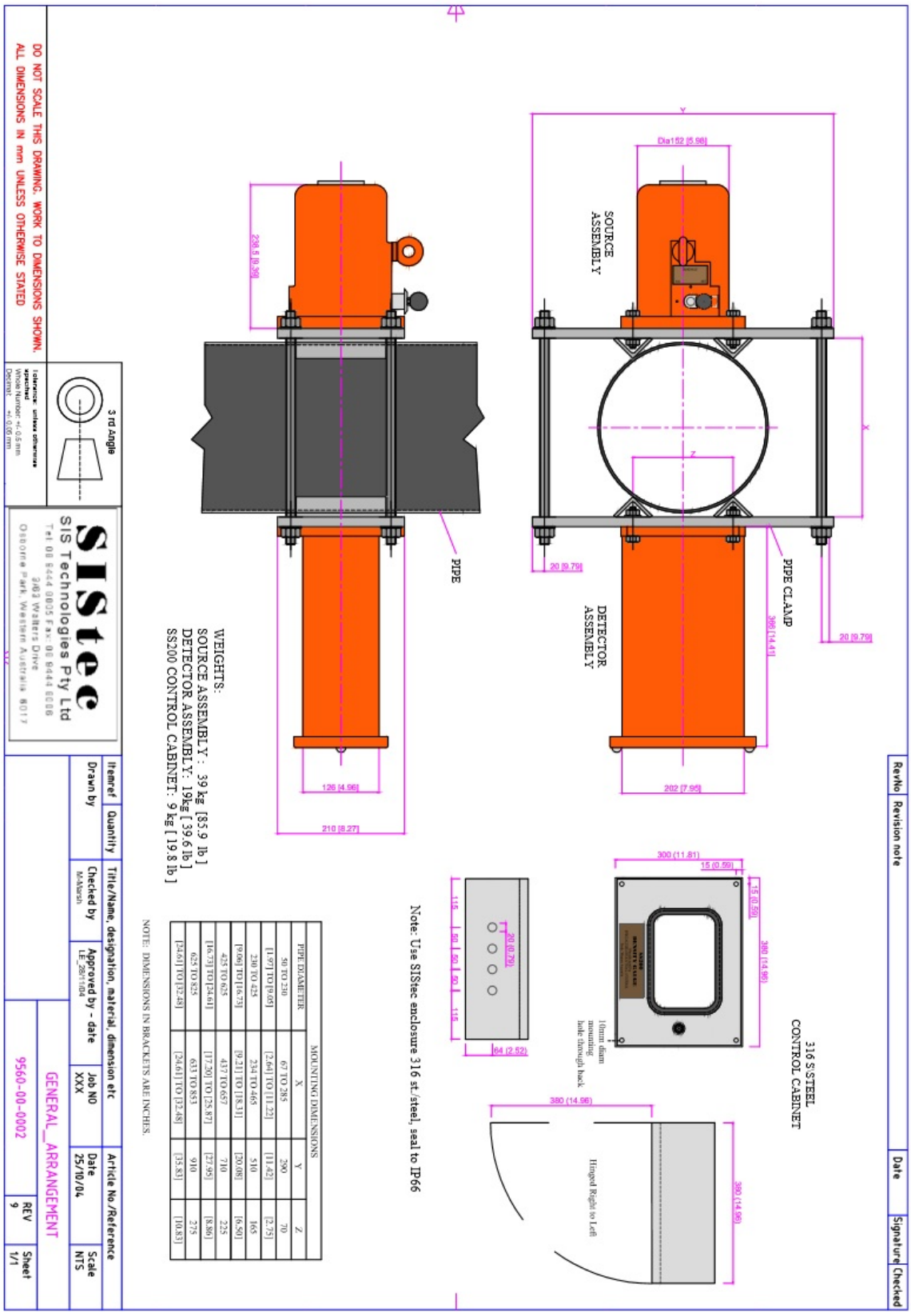


Figura G.1: SS200

Bibliografía

[1] George E. Dieter, Linda C. Schmidt, Engineering Design, Fourth Edition.

[2] R. D. Evan, Atomic Nucleus, McGraw-Hill, New York, 1955, Capítulos 23 - 25.

[3] Knoll, Glenn F., Radiation Detection and Measurement, 2nd Edition, Chapter 2

[4] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Octava Edición, México, 2008.

[5] Lipták, Béla G., Gamma-Ray Interactions with matter, in passive non-destructive analysis of Nuclear Materials, Los Alamos national laboratory, 4th Edition, CRC Press, 2003.

[6] Manual de sistemas y materiales de soldadura, Indura S.A., Chile, pag 93 [en línea]. <http://www.indura.cl/content/storage/cl/biblioteca/c230fb3467c14e16b09e360b3cc49860.pdf>

[7] Product data sheet 316L UNS S31600, AK Steel, West Chester [en línea]. <http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/stainless/austenitic/316_316l_data_sheet.pdf>

[8] Electrodos para Acero Inoxidable 316, Indura Argentina [en línea]. <http://www.indura.com.ar/Descargar/Electrodos%20para%20Soldar?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Far%2Fbiblioteca%2Fea9bd106bf24485ebd93fd213209699b.pdf>

[9] Propiedades de Esparrago de Acero Inoxidable 316, Southern Fasteners and Supply, Inc [en línea]. <http://www.southernfasteners.com/wp-content/uploads/ASTM-A320.pdf>

[10] El Ángulo Sólido y algunas de sus aplicaciones, Terenzio Soldovieri, Tony Viloria, pag 52 [en línea]. <https://www.researchgate.net/profile/Terenzio_Soldovieri/publication/

304149470_EL_ANGULO_SOLIDO_Y_ALGUNAS_DE_SUS_APLICACIONES_Descargar_actualizaciones_en_wwwcmcorgvetsweb/links/5767fe5608aeb4b9980b2897/EL-ANGULO-SOLIDO-Y-ALGUNAS-DE-SUS-APLICACIONES-Descargar-actualizaciones-en-ww
pdf>

[11] The Health Physics and Radiological Health Handbook, Bernard Shleien, Pharm. D., 1992 [en línea]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/08-0442-attach-3.pdf>

[12] Brillance 380 Scintillation material LaBr3(Ce), Saint Gobain [en línea]. <http://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/brillance380-material-data-sheet_69765.pdf>

[13] Brillance 380 Scintillation material Nal(Tl), Saint Gobain [en línea]. <http://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/efficiency_calculations_brochure_69670.pdf>

[14] Interacción de la radiación con la materia, [en línea]. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/sec_6.htm>

[15] Programa de calculo de dosimetría [en línea]. <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/401541/exe/Modulo/Modulo/leccin_22_composicin_y_accin_de_las_radiaciones.html>

[16] Coeficiente de fricción entre aceros [en línea]. <http://didactica.fisica.uson.mx/tablas/coefficients_of_friction.htm>

[17] Calculadora de Radiación [en línea]. <http://www.radprocalculator.com/Gamma.aspx>

[18] European Commission, Primera Edición de ATEX 2014/34/EU.

[19] Radiological protection, Sealed radioactive sources, ISO 2919:2012.

[20] Grado de protección IP, Norma internacional CEI 60529, Wikipedia.